

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів

(повна назва кафедри)

УДК

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. Г. Колобродов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ 21 ” 05 2018р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна  
(код і назва спеціальності)

техніка

на тему: Оцінювання якості цифрових камер для мобільних пристроїв

Виконав: студент 6 курсу, групи ПО-61 м  
(шифр групи)

Жулковський Артем Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Боровицький В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

к.е.н., доцент, Бояринова К.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент зав. каф., д.т.н., професор Протасов А.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2018 року



## Реферат

**Актуальність теми.** Для сучасного смартфона, якість цифрової камери є чи не найважливішим параметром для більшості користувачів. Проте популярний показник, на який опирається більшість покупців, кількість пікселів, далеко не повною мірою характеризує результуюче зображення. Питання універсальної характеристики якості камер мобільних пристроїв на сьогоднішній день є не розв'язаним і здебільшого вирішується суб'єктивним порівнянням знімків зроблених різними пристроями. Дана робота розкриває зміст характеристик якості зображення та будови камери смартфона, що розглядається в контексті впливу характеристик на кінцеву якість зображення.

**Мета й завдання дослідження.** Запропонувати універсальний метод для оцінки найважливіших характеристик якості камери. Для досягнення даної мети було поставлено такі наукові задачі: дослідити критерії якості зображення; дослідити будову камери смартфона та визначити характеристики, дослідження яких дозволить об'єктивно охарактеризувати якість камери; розглянути існуючі методи аналізу якості цифрових камер, зробивши акцент на їхніх перевагах та недоліках.

**Об'єкт дослідження.** Процес формування зображення у оптико-електронному тракту цифрової камери

**Предмет дослідження.** Показники якості цифрових камер.

**Методи дослідження.** У роботі використовувались аналітичні та експериментальні методи. Аналітичні методи використовували аналітичні вирази із розділів фізичної оптики. Експериментальні методи були спрямовані на визначення модуляційної передавальної функції для оцінки просторової роздільної здатності цифрової камери.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Запропоновано використовувати метод похилого раю для оцінки якості камер смартфонів, як економічно доцільного, не потребуючого спеціального обладнання, достатньо точного, що підтверджується результатами проведених досліджень.

**Публікації.** Результати роботи опубліковано у збірнику праць до науково практичної конференції «Погляд у майбутнє приладобудування», назва публікації: «Вимірювання МПФ камер мобільних пристроїв методом похилого краю».

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 103 сторінок, з обсягом основного тексту 96 сторінок. Дисертація містить 44 рисунка, 22 таблиці, список використаних джерел із 29 найменувань на 3 сторінках.

## Abstract

**Actuality of theme.** For a modern smartphone, the quality of a digital camera is perhaps the most important parameter for most users. However, the popular indicator, which rests the majority of buyers, the number of pixels, far from fully characterizing the resulting image. The question of the universal character of the quality of mobile devices chambers today is unresolved and is mostly solved by subjective comparison of images taken by different devices. This work reveals the content of the image quality and structure of the smartphone camera, which is considered in the context of the impact of characteristics on the final image quality.

**The purpose and tasks of the research.** Suggest a universal method to evaluate the most important characteristics of the camera. To achieve this purpose, the following scientific objectives were set: to explore the criteria for image quality; to investigate the structure of the camera of the smartphone and to determine the characteristics, the research of which will allow to objectively characterize the quality of the camera; consider the existing methods for analyzing the quality of digital cameras, focusing on their advantages and disadvantages.

**Object of study.** The process of forming an image in the optic-electronic path of a digital camera

**Subject of study.** Digital Camera Quality Indicators.

**Research methods.** The paper used analytical and experimental methods. Analytical methods used analytical expressions from the sections of physical optics. Experimental methods were aimed at determining the modulation transfer function for evaluating the spatial resolution of a digital camera.

**Scientific novelty of the obtained results.** It is suggested to use the method of an oblique paradise to assess the quality of smartphone cameras as economically feasible, not requiring special equipment, sufficiently accurate, which is confirmed by the results of the research.

**Publications.** The results of the work are published in the collection of papers for the scientific and practical conference "A View to the Future of Instrumentation",

the title of the publication: "Measurement of IPF cameras of mobile devices by the method of an inclined edge."

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five sections, conclusions, list of sources used. The full volume of work is 103 pages, with the volume of the main text of 96 pages. The thesis contains 44 figures, 22 tables, list of used sources from 29 titles in 3 pages.

## Зміст

<b>Список скорочень .....</b>	<b>9</b>
<b>Вступ.....</b>	<b>10</b>
<b>Розділ 1. Цифрова камера. Сучасний стан методів та апаратури для оцінки якості зображень цифрових камер</b>	
1.1. Об'єктив .....	13
1.2. Матриця .....	15
1.3. Технології автофокусування .....	18
1.3.1. Контрастний автофокус .....	18
1.3.2. Фазовий автофокус .....	19
1.3.3. Лазерний автофокус .....	22
1.4. Критерії якості оптичного зображення .....	23
1.5. I-SITE Інтегрована система для тестування та комплексної оцінки цифрових камер .....	27
1.6. Система тестування камери Meridian .....	28
1.7. Методи вимірювання МПФ .....	30
<b>Розділ 2. Математична модель цифрової камери</b>	
2.1. МПФ цифрових камер .....	47
2.2. Будова сучасних цифрових камер .....	50
2.3. Матричний фотоприймач .....	57
2.3.1. Просторова дискретизація .....	57
2.3.2. Шуми .....	62
2.4. Цифрова обробка зображень .....	66
2.4.1. RAW формат .....	66
2.4.2. Алгоритми JPEG стиснення .....	68
<b>Розділ 3. Вимірювання показників якості зображення цифрових камер</b>	
3.1. Метод похилого краю ( slanted edge ) .....	76
3.2. Вимірювання шумів .....	79
<b>Розділ 4. Експериментальна частина .....</b>	<b>83</b>

<b>Розділ 5. Розробка стартап проекту оцінювання якості цифрових камер для мобільних пристроїв .....</b>	<b>88</b>
5.1. Опис ідеї проекту .....	89
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	91
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	91
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	96
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	97
<b>Висновки .....</b>	<b>100</b>
<b>Літеатура .....</b>	<b>101</b>



## **Список скорочень**

МПФ – модуляційна передавальна функція

ОПФ – оптична передавальна функція

ФПМ – функція передачі модуляції

ФПФ – фазова передавальна функція

ФРК – функція розсіювання краю

ФРЛ – функція розсіювання лінії

ФРТ – функція розсіювання точки

## Вступ

Останніми роками ми стали свідками розвитку нової епохи, технологічної цифрової епохи. Одним із продуктів цієї ери вважається смартфон. Він включає безліч пристроїв, які колись були важкими, громіздкими та дорогими, всі в єдине середовище. Смартфон став широко доступним для кожного користувача і сьогодні є частиною нашого повсякденного життя.

Одним спеціальним пристроєм, що входить до складу смартфона, є цифрова камера. Спочатку вбудовані мобільні камери були неякісними і вважалися поганим вибором для створення знімків навіть аматорського класу. Однак останнім часом були розроблені новітні датчики, які є більш точними, широко доступними та недорогими. Технологічні тенденції показують, що у нових сенсорах, продовжують зменшувати розмір пікселів і додають перспективні нові технології, такі як підсвічування зворотного боку та матеріали з органічних плівок. Нові покоління камер мобільних телефонів швидко закривають великий пробіл, який існував між професійними цифровими дзеркальними фотоапаратами та "простими" мобільними камерами. Це впливає з ідеї, що деякі програми, які колись використовували високошвидкісні камери, тепер можуть бути доступні для мобільних камер.

На сьогоднішній день найскладнішим компонентом мобільного гаджету являється камера. В даній роботі ми розглянемо склад фотомодулю, процес формування зображення, що впливає на якість знімків, а також на скільки важливою є кількість мегапікселів у дійсності.

Камера смартфона являє собою складну багатокомпонентну систему. В її основі - матриця і об'єктив. Крім них в пристроях часто присутня непростя механіка для стабілізації і автофокусу, лазерні далекоміри, RGB-датчики і різні види спалахів. За загальну якість фотографій в широкому сенсі (колір, деталізація, динамічний діапазон і т.п.) найбільшою мірою відповідає модель встановленої в смартфон матриці і сполучена з нею система лінз. Від матриці залежить роздільна здатність знімків і кількість шуму на нічних фотографіях. Від характеристик об'єктиву - кут огляду, різкість та інші параметри одержуваної

картинки. У свою чергу, технологією використовуваного в смартфоні автофокусування, обумовлюються швидкість і точність наведення на різкість. Особливо це критично для виключення осічок в нічний час при фотографуванні рухомих об'єктів [1].

### **Мета та задачі дослідження**

Завдання контролю якості оптичних систем – задача, яка завжди є актуальною. Історично використовувалися різні параметри та характеристики, що певним чином описують якість системи: контраст, різкість, міра геометричної подібності, функція розсіювання, гранична крива, функція концентрації енергії та ін. Було розроблено десятки підходів до проведення вимірювань цих величин.

В останні десятиріччя, з розвитком інформаційних технологій, з'являються нові методи, засновані на непрямих вимірюваннях та складніших математичних розрахунках. На даний момент найбільш повною характеристикою якості оптичної системи вважається оптична передавальна функція, модуль якої – модуляційна передатна функція – характеризує передачу контрасту системою, а аргумент – фазова передатна функція – те, як система впливає на фазу оптичного сигналу.

Для вимірювання ОПФ було розроблено різні методи. Інтерференційні, гармонійного аналізу зображення тест-об'єкта, безпосереднього вимірювання ОПФ, використовуючи зображення наперед заданої просторової частоти, сканування ножом Фуко та ін.

Більшість з них мали суттєві недоліки, основними з яких були:

- труднощі вимірювання;
- необхідність робити велику серію знімків для покриття великого діапазону просторових частот;
- необхідність забезпечити велику точність механічних переміщень елементів приладу;
- необхідність постійного перефокусування системи, яка тестується;
- значні часові затрати;

Метою даного проекту є розробка універсального методу для якісної оцінки реальних характеристик камер мобільних пристроїв, та подання результатів у зрозумілій для користувача формі.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

1. Огляд сучасного стану апаратури для вимірювання якості цифрових камер.
2. Огляд будови цифрових камер.
3. Огляд критеріїв якості зображення.
4. Огляд методів вимірювання показників якості камер.

Дана робота передбачає також опрацювання технічної літератури з даної проблематики, систематизацію та узагальнення теоретичного матеріалу та огляд і опис відомих пристроїв, що представлені на ринку.

## **Розділ 1. Цифрова камера. Сучасний стан методів та апаратури для оцінки якості зображень цифрових камер**

### **1.1. Об'єктив**

Одну із ключових ролей у фотозйомці відведена фотооб'єктивам, адже саме вони формують направляючий на сенсор потік світла. Нинішні смартфони оснащені п'яти-, восьми-елементною оптикою. Конструкції приділено не менше уваги ніж аналогічним в професійних камерах.

Найчастіше матриці для смартфонів поставляються виробником вже в наборі зі спеціально підібраним об'єктивом. Але буває і так, що розробник конкретного смартфона сам вирішує, яке «скло» поставити перед матрицею. Це (а також алгоритми обробки зображення) і пояснює те, що в залежності від моделі пристрою одна і та ж матриця може проявляти себе зовсім по-різному[29].

В цілому, від якості системи лінз дуже сильно залежить кінцева якість картини. Наприклад, якщо перед хорошою матрицею встановлена відверто погана оптична система, яка просто не здатна «дозволити» сенсор, то ніякого підвищення деталізації на знімках не буде, скільки б не було багато мегапікселів. Файли зображень будуть величезними за розміром з формально великою кількістю пікселів, але чіткості на фотографіях від цього не додасться [29].

У різних об'єктивів різкість може істотно відрізнятися по всьому полю кадру, також часто присутня проблема хроматичної аберації (ХА). Якщо в смартфоні хороша оптика, то на тестових знімках не опиниться «мила» в кутах кадру, а при зйомці, наприклад, тонких гілок дерев в контровому світлі (чорні контури на тлі яскравого неба) не виникатимуть колірні ореоли (ті самі ХА) [29].

Не менш важливими параметрами об'єктива є фокусна відстань і величина діафрагми. В смартфонах зазвичай використовуються ширококутні об'єктиви, так як маленька матриця має великий кроп-фактор. Скажімо, надширококутна 4-мм зіниця на смартфоні за кутом огляду буде приблизно відповідати об'єктиву з фокусною відстанню 30-мм, встановленому на фотоапараті з повнокадровим сенсором [29].

Загалом, в плані фокусної відстані серед смартфонів немає суттєвої різниці: майже всі девайси мають ширококутну оптику, що дозволяє вмістити багато всього в кадр, не відходячи від об'єктів зйомки надто далеко. Деякі смартфони оснащені особливо ширококутними об'єктивами, зі збільшеним до 135 градусів кутом огляду. Така оптика дозволяє охопити велику сцену, але привносить небажані геометричні спотворення. Наприклад, надмірно широкий кут на фронтальних камерах спотворює пропорції обличчя і викликає ефект «риб'ячого ока» [29].

Відзначимо також, що хоча більшість смартфонів сьогодні володіє оптикою з фіксованою фокусною відстанню, бувають моделі нехай і з невеликим, але повноцінним оптичним зумом (iPhone 6S, iPhone 7 Plus, Asus Zenfone 3 Zoom, Xiaomi Mi 6) [29].

Діафрагмове число (F). (Рис.1.1) Ця величина є оберненим значенням відносного отвору об'єктива (відношення «зіниці» до фокусної відстані об'єктива). Тобто чим менше діафрагма, тим більше отвір. Об'єктив пропустить більше світла, матриці доведеться менше «посилювати» сигнал. А значить, при інших рівних стане можливим робити якісні знімки вночі (коли мало світла) з меншою кількістю шумів. Під час огляду ринку смартфонів, було виявлено, що більшість камер мають значення діафрагми  $f/2$  та  $f/2.2$ , і лише деякі флагманські моделі мають показники  $f/1.8$  та  $f/1.7$  [29].

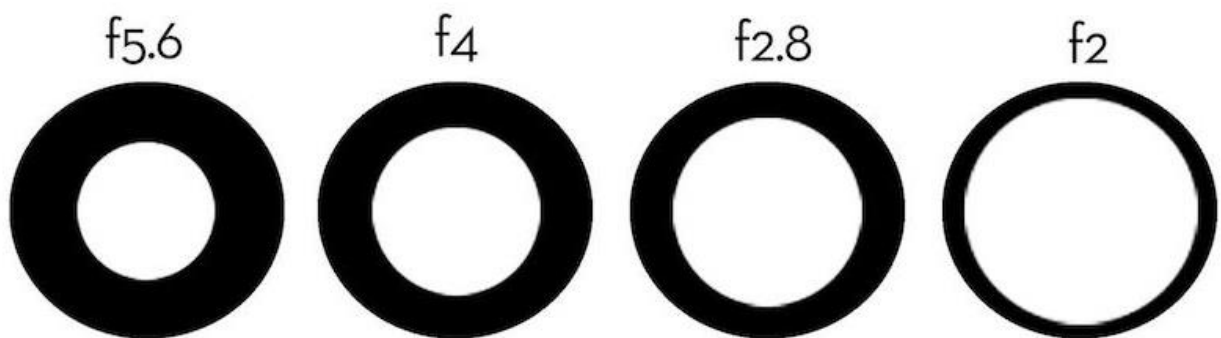


Рис.1.1 Діафрагмове число

Взагалі зйомка при повністю відкритій діафрагмі не завжди оптимальна з точки зору деталізації знімка, але з огляду на технологічні особливості

смартфонів вона не регулюється. При виборі смартфону, варто віддати перевагу апарату з об'єктивом з більшою діафрагмою, оскільки це дозволить, при інших рівних, забезпечити кращу якість зображення в умовах недостатньої освітленості[2].

Pixels	Sensor size	Sensor maker	Sensor	Lens composition	Glass thickness	Focal Length	F №	FOV	Effective image circle
8.0 Mega	1/2.9"	Samsung	3H3	5P	0.3	4.07	2.2	73.7	6.5
	1/3.2"	Omni	OV-8820/30	5P	0.3	3.807	2.2	74.4	6.17
		Aptina	AR0833						
		SONY	IMX105/175						
		Samsung	3H3/3H7						
		Omni	PV-8820	4P	0.3	4.5	2.8	65.4	6.0
		Aptina	AR0830/33						
		Omni	OV-8820/30	5P	0.21	3.724	2.0	75.1	6.1
		Aptina	AR0833						
		SONY	IMX105/175						
		Samsung	3H2/3H7						
		Omni	OV-8830	5P	0.3	4.36	2.4	66	6.05
		Aptina	AR0833						
		SONY	IMX105/175						
12 Mega	1/3.2"	Samsung	3L1	5P	0.3	3.81	2.5	72.4	6.18
				5P	0.3	4.003	2.4	70.2	6.14
				5P	0.21	3.46	2.4	76.4	6.012
13 Mega	1/3"	SONY	IMX091/135	5P	0.3	3.972	2.0	72.9	6.167
		SONY	IMX091/135	5P	0.3	3.807	2.2	75.3	6.167

Таблиця 1.1 Приклади об'єктивів у відповідності до сенсорів[X]

## 1.2. Матриця

На сьогодні поширена думка, що кількість Мп - ключовий параметр, який впливає на якість фото. Насправді, це досить значний критерій, але далеко не єдиний. Число точок - всього лише одна з характеристик складної конструкції пристрою, роботу якого буде описано далі.

Історично однією з найкращих за якістю вважалася CCD-технологія, але з певних причин велику частку на ринку захопила технологія CMOS. У смартфонах також використовуються різновиди CMOS-технології. Цей тип матриць має низку особливостей, найбільш важливих для мобільних гаджетів: CMOS-матриці мають низьке енергоспоживання, дозволяють розміщувати підсилювачі всередині пікселя (що покращує якість при поганому освітленні), більш дешеві у виробництві, забезпечують високу швидкість роботи при формуванні зображення і при візуванні в реальному часі.

Крім кількості пікселів на матриці, реальна якість і «чистота» створюваного цифрового зображення сильно залежать від фізичного розміру матриці і фізичного розміру кожного пікселя окремо. Чим більше окремо взятий піксель, тим кращою світлочутливістю він володіє. А чим більше фізичний розмір матриці, тим простіше на ній розмістити досить великі пікселі на деякій відстані один від одного. Це дозволяє зменшити паразитне перетікання зарядів від сусідніх пікселів, через які з'являються перешкоди і викиди, іменовані цифровим шумом [29].

У смартфонах зазвичай стоїть невелика матриця, яка за площею приблизно в 50 разів менше, ніж в повнокадровій дзеркальній камері. Збільшити розмір матриці в смартфонах дуже складно - надто мало місця в тонкому компактному корпусі. Зайва кількість пікселів при невеликій матриці веде до зменшення розміру пікселів, тобто погіршення світлочутливості і збільшення кількості шумів знімків [29].

Іншими словами, не можна судити про камеру, ґрунтуючись тільки на кількості мегапікселів. Якщо хочеться менше шумів і більш високої якості на нічних знімках - розмір пікселя важливіше. Є технологія об'єднання декількох пікселів в один. Вона дозволяє за рахунок зниження роздільної здатності підвищити світлочутливість матриці при зйомці в умовах низької освітленості[29].

В умовах фізичних обмежень виробники направили зусилля на поліпшення якості зображення за рахунок нових технологій. Так що велика кількість



мегапікселів не завжди погано - сучасні матриці з застосованими технологіями ізоляції пікселів один від одного, якісною системою лінз і хорошою програмною оптимізацією цілком здатні і прийнятно фотографувати вночі, і видавати деталізовані знімки при яскравому сонячному світлі. Часто саме такі матриці дозволяють проводити зйомку в 4K з високим fps і забезпечують «запас» по роздільній здатності, що дозволяє якісно реалізувати цифрове масштабування і цифрову стабілізацію [29].

Матриці CMOS реалізуються по-різному у різних виробників і постійно доповнюються всякими «технологіями», покликаними боротися з характерними для даного класу пристроїв проблемами. Так, у великій кількості смартфонів застосовуються традиційні сенсори з технологією зворотного засвічення (BSI), яка дозволяє знизити кількість шуму в порівнянні зі звичайною CMOS-матрицею при зйомці вночі. Існують і матриці з назвою ISOCELL - це допрацьована компанією Samsung технологія BSI. По суті такі сенсори - все ті ж CMOS-матриці, але в них кожен піксель додатково ізолюваний від сусіднього, щоб також зменшити шуми при нічній зйомці і поліпшити передачу кольору на фотографіях, зроблених при поганому освітленні [29].

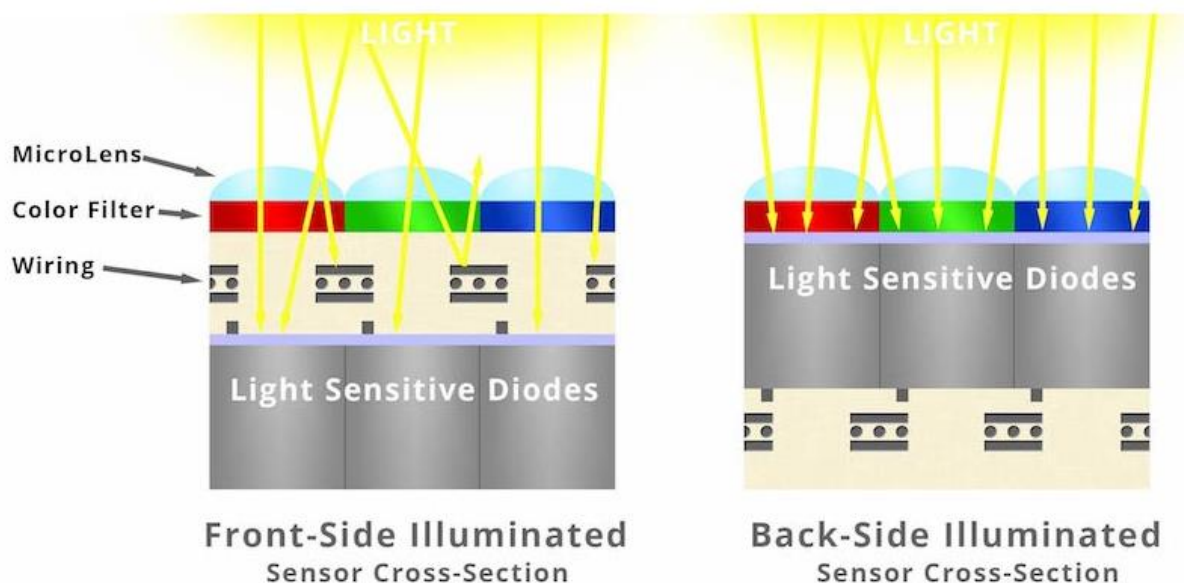


Рис. 1.2 CMOS матриця

Матриці Exmor RS у компанії Sony примітні багаторусною. структурою - електронного «обв'язування» пікселя, що знаходиться під ним, а не поруч з ним.

На таких сенсорах елементи на наявній площі розташовуються більш раціонально. Також є додатковий білий субпіксель (схема WRGB) для збільшення яскравості зображення в умовах слабкої освітленості.

Ще один різновид CMOS - матриці з фільтром RGBC. На відміну від звичайного байеровського масиву (де дві зелені комірки, одна червона і синя), в них присутній, грубо кажучи, «прозорий» піксель, який краще пропускає на сенсор всю інформацію про яскравість світла. Ці дані потім додатково використовуються матрицею для побудови зображення [29].

### **1.3. Технології автофокусування**

Важко уявити сьогоdnішній флагман без автофокусу. Механізм фокусування забезпечує зміну різкості між ближніми і дальніми точками знімка. З фіксованим фокусом можна знімати лише на далеких відстанях, загальним планом, тоді як фото поблизу або макро - швидше за все вийдуть розмитими.

Перші камерафони мали фіксований фокус. У сучасних же смартфонах передбачена можливість регулювати відстань між лінзами і сенсором. Тому ви отримуєте якісні деталізовані знімки. Існує два режими роботи автофокусу: пасивний і активний. Сенс в тому, що система визначає відстань від фокальної площини до об'єкта зйомки, активний автофокус домагається цього за рахунок елементів, що взаємодіють з об'єктом зйомки (ультразвуковий або інфрачервоний локатори), а пасивний не взаємодіє з самим об'єктом і нічого не випромінює - він лише аналізує світлові пучки, що потрапляють в камеру.

#### **1.3.1. Контрастний автофокус**

Контрастний автофокус відноситься до пасивного виду автофокусу. До цих пір це рішення застосовується в більшості смартфонів, оскільки є одним з найпростіших. За допомогою сенсора відбувається замір кількості світла на об'єкті, після цього він же переміщує лінзу в залежності від контрасту. Якщо контраст максимальний, то і яскравий об'єкт перебуває у фокусі. (Рис. 1.3)

Взагалі, контрастний автофокус цілком непогано справляється зі своїм завданням і має великий плюс - він досить простий і не вимагає якогось складних механічних систем для своєї роботи.

Але є у нього і кілька недоліків. Зокрема, контрастний автофокус працює повільніше інших - зазвичай йому потрібна приблизно одна секунда, щоб сфокусуватися на об'єкті. За цей час ви можете перехотіти робити знімок, або момент буде упущений, якщо хотіли зняти, наприклад, рухомих об'єктів.

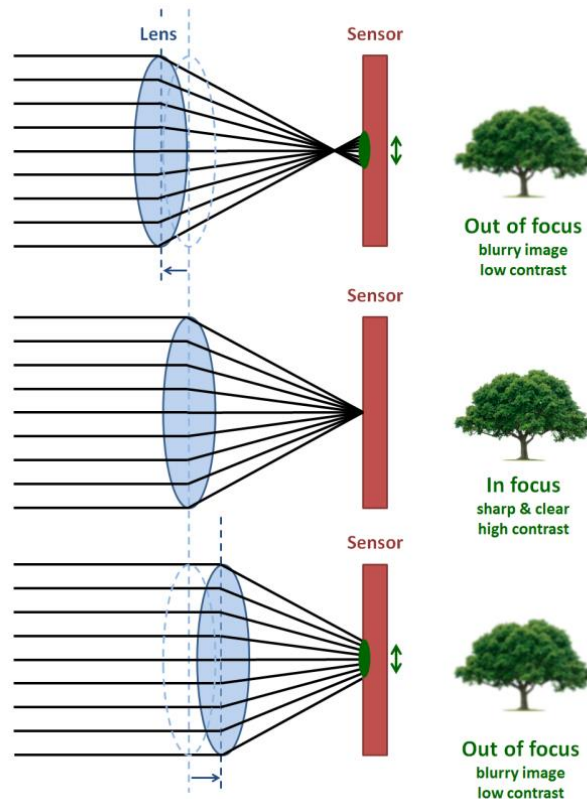


Рис.1.3 Контрастний автофокус

Це відбувається через те, що лівову частку часу займає процес «зрушення точки фокусування / лінз об'єктива - оцінка контрастності - зрушення - оцінка контрастності». Крім того, у контрастного автофокусу відсутня можливість фокусування, що стежить, та й в умовах поганого освітлення він навряд чи вас вразить. Тому даний тип автофокусу на сьогоднішній день використовується переважно в бюджетних смартфонах.

### 1.3.2. Фазовий автофокус

Одним з першопрохідців тут була компанія Samsung, яка запозичила технологію у цифрових дзеркальних фотокамер і оснастила фазовим

автофокусом свій смартфон Galaxy S5. Суть в тому, в даному випадку застосовуються спеціальні датчики - вони ловлять світловий потік від різних точок зображення, використовуючи лінзи і дзеркала. Усередині датчика відбувається розподіл світла на дві частини, кожна з яких потрапляє на надчутливий сенсор. Відстань між потоками світла вимірюється датчиком, після чого він сам визначає, наскільки потрібно зрушити лінзу для точного фокусування. Так, наприклад, Samsung Galaxy S5 потрібно всього 0,3 секунди, щоб сфокусуватися на об'єкті.

Візуально принцип роботи фазового автофокусу представлений нижче. (Рис 1.4)

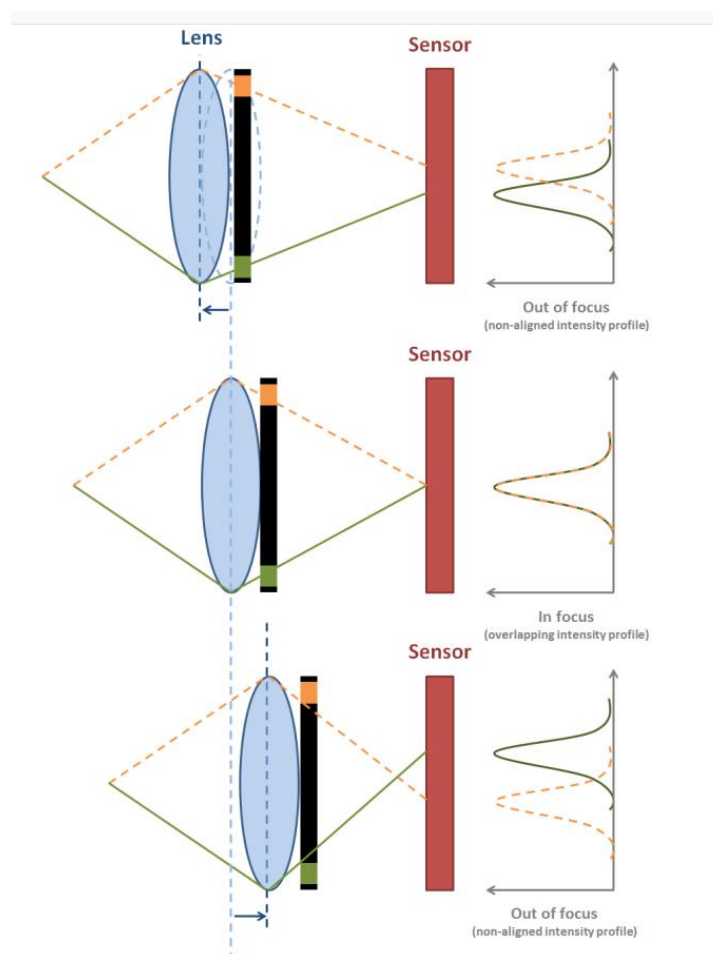


Рис.1.4 Фазовий автофокус

Перша і головна перевага фазового автофокусу - він набагато швидше контрастного. Крім того, камера може оцінювати рух об'єкта за допомогою датчиків, звідси отримуємо можливість автофокусу, що стежить за об'єктом фокусування.

Але є і мінуси. Фазовий автофокус, як і контрастний, також не дуже добре справляється зі своїми завданнями в умовах недостатнього освітлення. Також для нього необхідно більш потужне «залізо», тому він, як правило, доступний в смартфонах сегмента high-end. Серед них Huawei Honor 7, Sony Xperia M5 і Samsung Galaxy Note 5.

Apple в своєму iPhone 6s і iPhone 6s Plus використовує так звані «фокусні пікселі» - суть в тому, що технологія використовує частину пікселів в якості фазового сенсора, і зйомка на смартфони від Apple виходить дійсно швидкою. По суті це той же самий фазовий автофокус, тут вже треба віддати належне маркетологам [29].

А ось технологія Dual Pixel (Рис.1.5), яку компанія Samsung застосовує в своїх смартфонах Galaxy S7 і Galaxy S7 Edge, дійсно відрізняється від фазового фокусування в камерах інших смартфонах. Вона хоч і є різновидом фазового автофокусу, але все ж має деякі відмінності та тонкощі. У смартфонах фазовий автофокус дещо обмежений - щоб привласнити кожному пікселю фокусний сенсор, потрібно сильно його зменшити, звідси отримаємо шуми і нечіткість фотографій. Зазвичай датчиками оснащують близько 10% світлочутливих точок, проте, деякі виробники не виходять і за 5%.

У Dual Pixel ж кожен піксель оснащений окремим датчиком через збільшення розмірів пікселів. Процесор обробляє свідчення кожного пікселя, але робить це настільки швидко, що автофокусування все одно займає десяті частки секунди. В Samsung говорять, що технологія Dual Pixel подібна фокусуванню за допомогою людського ока, але це знову ж таки маркетинговий хід [29].

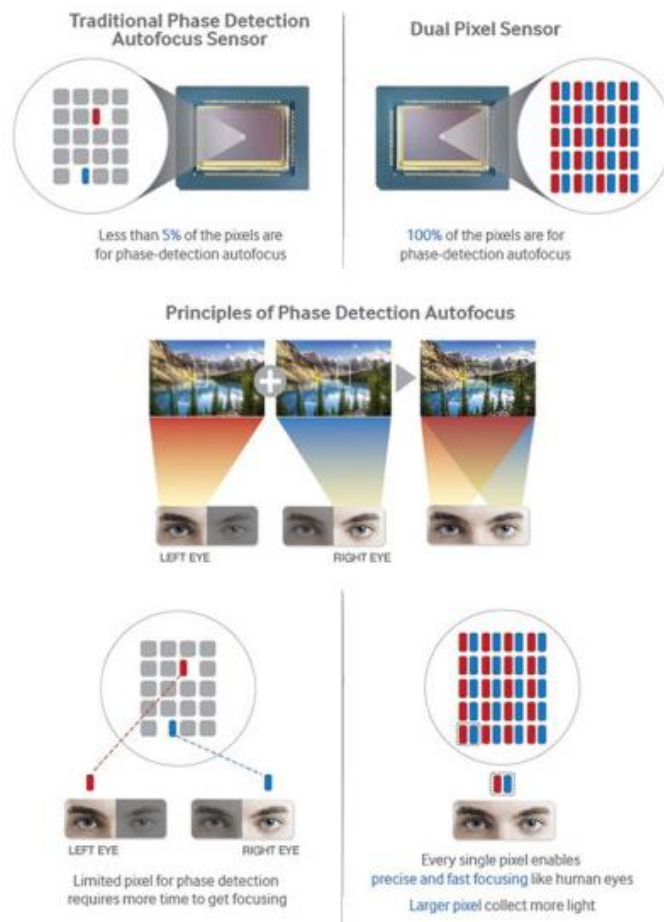


Рис. 1.5 Dual Pixel

### 1.3.3. Лазерний автофокус

Як і фазовий, лазерний автофокус відноситься до активного типу автофокусу. Цим напрямком довгий час займалася компанія LG, яка спершу реалізувала лазерний автофокус в своєму смартфоні G3. В основі роботи технології лежить принцип лазерного далекоміра. Одна з головних переваг даного автофокусу - час. Як кажуть в LG, весь процес автофокусування за допомогою лазера займає 0,276 секунди. Значно швидше контрастного автофокусу і трохи швидше, ніж фазовий.

Очевидна перевага лазерного автофокусу – швидкість роботи і робота в умовах недостатнього освітлення. Але працює він тільки на певній дистанції - найкращий ефект досягається, якщо відстань від смартфона до об'єкта становить менше 0,6 метра. А після п'яти метрів досягнути бажаного ефекту не вдасться [29].

#### 1.4. Критерії якості оптичного зображення

Характеристики якості зображення залежать від вимог, що пред'являються до оптичних систем. Оптичні системи астрономічних приладів, телескопічних систем, розраховуються з мінімальними абераціями, і основним обмеженням таких систем є дифракція на вхідній зіниці. Для оцінки якості зображення в таких системах, може бути використана функція розсіювання. Якість зображення оптичних систем, що мають велике кутове поле зору, працюючих з оком, матричним приймачем, телевізійною камерою, краще характеризувати контрастом, різкістю, мірою геометричної подібності. Критерієм якості зображення в цих системах може бути гранична крива [2].

Оптичні системи оптико-електронних приладів, що працюють з одноелементним приймачем, які призначені для передачі світлової енергії на чутливу ділянку приймача променистої енергії, краще характеризувати функцією концентрації енергії [2].

Універсальною характеристикою якості зображення, яка описана міжнародним стандартом ISO12233, є оптична передатна функція, яка включає дві складові :

- модуляційну передатну функцію (МПФ);
- фазову передатну функцію (ФПФ).

Функція розсіювання - це розподіл освітленості в зображенні, нескінченно віддаленої в площині предметів точки, що світиться, в площині найкращого зображення. Цей розподіл є дифракційною картиною [2].

Для реальних оптичних систем ця функція розсіювання найчастіше апроксимується гаусоїдою обертання. Для ідеальних оптичних систем, в яких якість зображення обмежена лише дифракцією, вид функції розсіювання є дифракційним диском Ері. Вигляд нормованої функції розсіювання для ідеальної оптичної системи графічно приведений на рис.1.6.

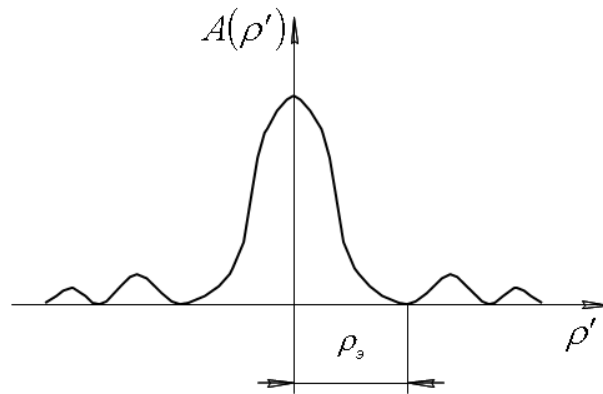


Рис.1.6 - Нормована функція розсіювання ідеальної оптичної системи.

В центральному колі функції розсіювання міститься приблизно 84% світлової потужності всього кола розсіювання. Це коло приймають за зображення точки. Переферійні кільця містять відповідно 16% світлової потужності і являють собою фон зображення. В реальних системах відбувається перерозподіл енергії між центральним колом і переферійними кільцями. Особливо складно виглядає картина для позавісьової точки в площині зображення. В зв'язку з цим функцію розсіювання в основному використовують для оцінки якості зображення оптичних систем з невеликим полем зору і по центру поля зору [2].

Функція розсіювання, що характеризує розподіл енергії в зображенні світної точки носить назву функції розсіювання точки (ФРТ). Поняття функції розсіювання поширюють і на розподіл освітленості в зображенні світної лінії, що розташована в нескінченності в площині предметів. В цьому випадку функція розсіювання носить назву функції розсіювання лінії (ФРЛ). ФРЛ є результат інтегрування ФРТ по одному з напрямів [2].

Для виробничого контролю оптичної системи по функції розсіювання використовують різні числові критерії:

- лінійна або кутова роздільна здатність;
- число Штреля;
- функція концентрації енергії в колі розсіювання.

Лінійну роздільну здатність при некогерентному освітленні визначають як найменшу відстань між двома точками, контраст сумарного зображення яких не менше порогового контрасту приймача. Для візуальних систем користуються



критерієм Релея, при якому лінійна роздільна здатність дорівнює радіусу кружка Ері [2].

Кутова роздільна здатність оптичних систем з урахуванням певного значення радіусу кружка Ері визначається в радіанах за формулою:

$$\psi'' = \frac{\rho_z}{f'_{об}} \quad (1.1)$$

Недолік цього критерію полягає в тому, що характеристики оптичних систем визначаються спільно з характеристиками приймача випромінювання. Тому був використаний більш об'єктивний критерій, що оцінює тільки оптичні системи і носить назву число Штреля або визначальна яскравість [2].

Число Штреля - це відношення найбільших значень освітленості в центрі дифракційної плями реальної системи, для якої хвильова аберація не дорівнює нулю, і безабераційної системи. Тобто, це найбільше нормованне значення освітленості в дифракційній картині зображення від точкового джерела. Встановлено, що оптична система є високоякісною, якщо [2].

Функція концентрації енергії в колі розсіювання. Її характеризує відношення кількості енергії усередині кола з радіусом до усієї енергії в колі розсіювання :

$$\eta(\rho') = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\rho'} A(\rho', \varphi) \cdot \rho' \varphi \cdot d\rho' d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} A(\rho', \varphi) \cdot \rho' \varphi \cdot d\rho' d\varphi} \quad (1.2)$$

Чим більше значення  $\eta$ , тим краща оптична система. Аналітичне значення для  $\eta$  відомо тільки для безабераційної системи з круглою зіницею:

$$\eta(\rho') = 1 - I_0(z_0) - I_1^2(z_1) \quad (1.3)$$

де  $I_0$ ,  $I_1$  - функції Бесселя нульового і першого порядку;  $z_0$ ,  $z_1$  - параметри функцій, в які входять значення  $\rho'$ .

Гранична крива - це розподіл освітленості в зображенні пограничного тесту. Пограничний тест є межею світлого і темного полів. Функція яскравості такого тесту є функцією стрибка. Вигляд розподілу яскравості для пограничного тесту і розподілу освітленості в зображенні цього тесту показаний на рис.1.7.[2].

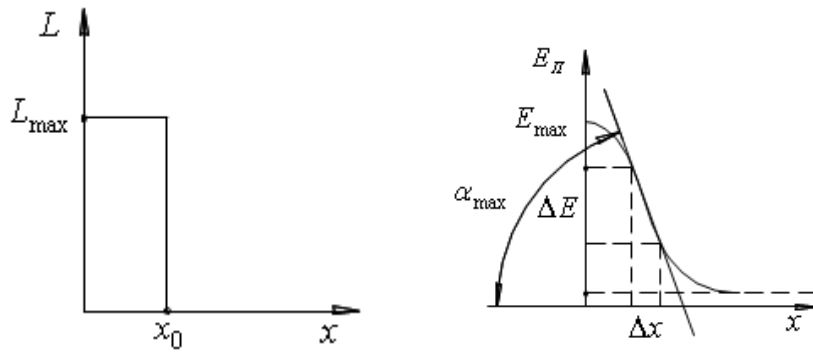


Рис.1.7 Вигляд розподілу яскравості для пограничного тесту і розподілу освітленості в зображенні цього тесту.

Для кількісної оцінки якості різних оптичних систем з використанням граничної кривої застосовують такі числові характеристики:

– пограничний градієнт - значення тангенса кута нахилу дотичної в середній точці пограничної кривої до осі абсцис. Чим більше значення , тим кращою є оптична система.

$$G_{\max} = \operatorname{tg}(\alpha_{\max}) = \frac{\Delta E}{\Delta x} \quad (1.4)$$

– критерій враховує перепад максимальних і мінімальних значень освітленості в граничній кривій.

$$P = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{G_{\max}} \quad (1.5)$$

Математично гранична крива може бути отримана як результат інтегрування функції розсіювання лінії по одній з координат. Відповідно, щоб отримати пограничну криву з ФРЛ, треба продиференціювати функцію розсіювання лінії по одній з координат.

Оптична передатна функція (ОПФ) - це найбільш універсальний критерій, який повністю характеризує якість оптичної системи. Він показує, як оптична система відтворює різні просторові частоти. Міжнародна організація по стандартизації (ISO) прийняла його як основний для оцінки якості оптичної системи.

Оптичну передатну функцію можна представити у вигляді модуля і аргументу. Модуль ОПФ має назву модуляційна передатна функція (МПФ). Аргумент ОПФ назву фазова передатна функція (ФПФ).

Фізично модуль ОПФ показує, з яким контрастом оптична система відтворює різні просторові частоти. Його інколи називають частотно-контрастною характеристикою (ЧКХ) або функцією передачі модуляції (ФПМ).

Фазова передатна функція показує як оптична система впливає на початкові фази гармонік, що характеризують об'єкт. Для систем з осесиметричною аберацією фазова передатна функція дорівнює нулю. У інших випадках початкові фази гармонік в площині зображення опиняються зрушеними відносно початкових фаз тих же гармонік площини предметів. На рис. 1.8 показано графіки нормованих МПФ та ФПМ.

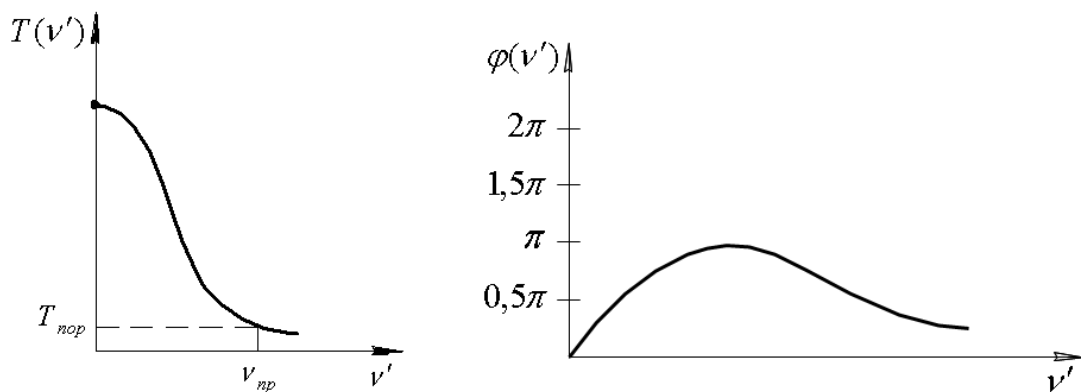


Рис.1.8 - Нормована модуляційна передатна функція та нормована фазова передатна функція.

Перевага ОПФ перед іншими критеріями полягає в тому, що МПФ складної системи може бути отримана, як результат добутку МПФ окремих її елементів [3] :

$$T_c(v'_x, v'_y) = \prod_{i=1} T_i(v'_x, v'_y) \quad (1.6)$$

### 1.5. I-SITE Інтегрована система для тестування та комплексної оцінки цифрових камер

Система I-SITE <sup>TM</sup> - це найбільш гнучкий тестовий комплект, доступний у комерційній мережі, тестування дискретних компонентів через повні системи.

Система I-SITE™ призначена для вимірювання в кількох точках ланцюга обробки сигналів для багатьох типів електрооптичних систем.

Пакет програмного забезпечення I-SITE™ розроблено спеціально для підключення пристроїв Optikos, пристроїв позиціонування та інших вимірювальних пристроїв до сумісних систем Windows NT. За допомогою відповідного апаратного забезпечення програма I-SITE™ може записувати дані безпосередньо оптичних зображень або відеосигналів, щоб зробити ряд важливих вимірювань майже на будь-якій електрооптичній системі. Існує стандартна конфігурація I-SITE™ для тестування теплових зображень, ПЗЗ-камер, дисплеїв та підсилювачів зображення.

Виконані фактичні вимірювання залежать від використовуваного фізичного вимірювального пристрою. Є багато варіантів, які можуть бути використані; таким чином, немає єдиної настройки I-SITE™. Джерела, тест об'єкти та проміжна оптика можуть бути налаштовані відповідно до ваших вимог, і пропонуються кілька різних параметрів аналізу [21].

### **Вимірювання:**

Системи I-SITE™ підтримують такі електрооптичні вимірювання:

- Функція розсіювання ліній (LSF)
- Функція передачі модуляції (MTF)
- Функція передачі сигналу (SiTF)
- Спектр шуму (NPS)
- Корисний середній квадратний шум (RMS)
- Шум еквівалентний яскравості (NEL)
- Мінімальний роздільний контраст (MRC)
- Мінімальний виявлювальний контраст (MDC)

### **1.6. Система тестування камери Meridian**

Ідея концепції "Меридіан" полягає в тому, щоб використовувати кілька цільових проекторів (часто коліматорів, але не завжди) для проектування задньо-освітленого тест об'єкту під необхідним кутом. Ця ідея принципово відрізняється від підходу лабораторного тестування розглянутої вище лінійки

продуктів I-SITE, в якій кожна польова точка адресована і перевірена послідовно, змінюючи положення точки що випробовується щодо коліматора. Принципи аналізу зображень, однак, дуже схожі, і алгоритми, які призначені знаходити та аналізувати декілька зображень у межах поля, мають спільні алгоритми. Важливим моментом є диференціація Optikos ' Лінійка продуктів Meridian та інші кластери цільових проекторів - це спосіб встановлення кутів поля. Після розгляду кількох підходів, в яких коліматорні кути, наприклад, можуть бути скоректовані і дійсно повинні бути індивідуально встановлені користувачем, компанія відкинула ідею "універсальної" системи, як системи, що буде нездійсненною у виробничому середовищі. Натомість було знайдено рішення, згідно з яким, використовуються параметричні можливості сьогоденного програмного забезпечення CAD та висока точність обробки ЧПУ з трьох та п'ятьма осями, щоб встановити цільові проекторні збірки, розроблені спеціально для ідеальної відповідності вимогам тестування конкретних камер [20].

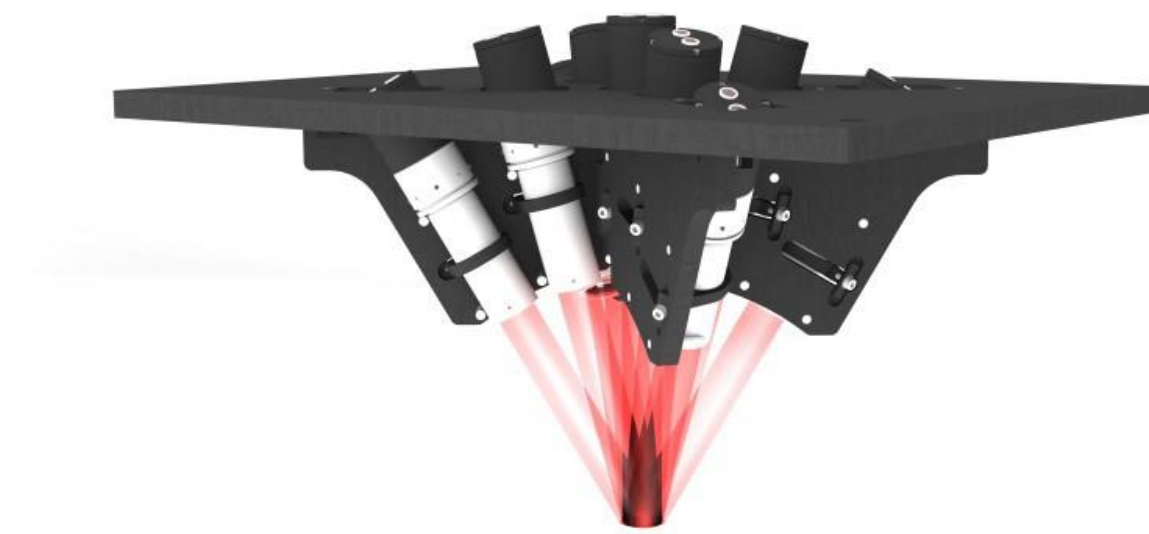


Рис.1.9 Обладнання " Meridian Arck"

Якщо кількість тестових налаштувань є відносно великою та графік доставки може бути дещо більш розширеним, то Меридіан Старфілд може бути монтажною схемою вибору. У той час як Арка складається з складання оброблених пластин, моноліт Starfield є монолітним дизайном, що складається з товстої пластини, в яку обробляються точні отвори для отримання цільових

проекційних бочок. Ця обробка механізмів обов'язково вимагає 5-осевого обробного центру з ЧПК, а САМ-програмування, обробка прототипу та фіксація для операції обробки займає більше часу і коштує дорожче, ніж для арки. З іншого боку, ці витрати є неодноразовими і менш значимими при амортизації за декількома таблицями Starfield [20].

Лінійка продуктів Meridian - це цілковите рішення для тестування камер і включає в себе програмний пакет Meridian Prime для аналізу зображень, зроблених випробуваною камерою. Програмне забезпечення Prime також забезпечує безпосередній контроль над ілюмінаторами, що використовуються у цільових проекторах. Головне програмне забезпечення складається з двох компонентів: графічного інтерфейсу користувача (GUI) та бібліотеки функцій. GUI надає користувачам інтерфейс для налаштування та тестування налаштування вимірювань. Результати відображаються у графічному та текстовому форматах, а зображення можуть бути збережені та завантажені для аналізу. У випадках, коли головне програмне забезпечення було налаштовано для доступу до відео з UUT безпосередньо, відеоролик із накладанням зразків регіонів зображення також може розглядатися з графічного інтерфейсу користувача. У виробничих середовищах це не рідкість для системного інтегратора контролює всю послідовність обробки деталей та етапів вимірювання з програми на більш високому рівні. У таких випадках програмне забезпечення користувача може викликати Головну бібліотеку функцій для отримання результатів тестування та виконання інших функцій, доступних через графічний інтерфейс користувача [20].

### **1.7. Методи вимірювання МПФ**

Існує декілька методів виміру МПФ. Нещодавні досягнення в точній механіці та електро-оптичних технологіях дали змогу розробити велику кількість практичних варіацій цих методів, які забезпечили ефективне вимірювання ОПФ з високою точністю.

## Установки з гармонійним аналізом оптичного сигналу

Ці установки найбільш прості по конструкції, збираються на оптичній лаві і діють за принципом фотоелектричного фотометра. Для вимірювання МПФ на кожній просторовій частоті достатньо вимірювати модуляцію в зображенні синусоїдальної міри на цій просторовій частоті і поділити на модуляцію потоку випромінювання в самій мірі [2].

В установках такого типу оптична система що досліджується, буде зображення тест - об'єкта простої форми (синусоїдальної міри), а розташований в площині зображення аналізуючий елемент (вузька щілина) пересувається в площині зображення послідовно вимірюючи максимальне і мінімальне значення освітленості. Схема установки представлена на рис. 1.10 [2].

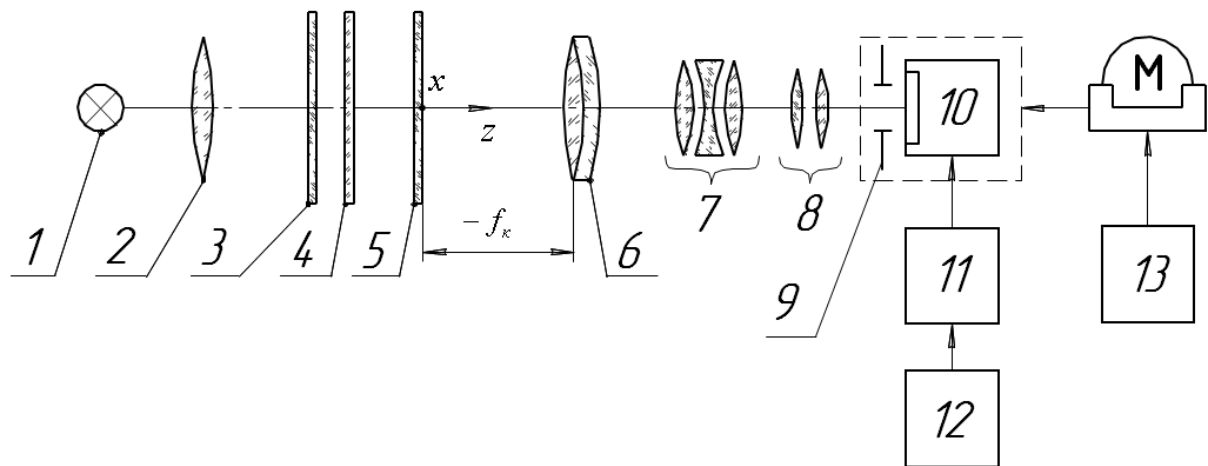


Рис. 1.10. Схема установки з гармонійним аналізом оптичного сигналу.

Установка містить: 1— джерело світла (лампа розжарювання); 2— конденсор; 3— світлофільтр, розрахований на спектральну область роботи випробовуваного об'єктиву; 4— світлорозсіювач або молочне скло; 5— тест-об'єкт; 6— коліматорний об'єктив; 7— випробовуваний об'єктив; 8— проекційний мікрооб'єктив; 9— аналізуюча (щілина) діафрагма; 10— приймач променистої енергії (одноеlementний); 11— підсилювач; 12— блок реєстрації; 13— кроковий двигун, що забезпечує переміщення [2].

Для того, щоб установка працювала за принципом гармонійного аналізу оптичного сигналу тест-об'єкт 5 повинен мати закон розподілу яскравості, що є гармонійною функцією. Враховуючи, що технологія створення таких тест-

об'єктів складна, на практиці застосовують тест-об'єкти з прямокутним законом розподілу яскравості, як це показано на рис. 1.11. Закон розподілу яскравості такого тест-об'єкта має вигляд якій показаний на рис.1.12 [2].

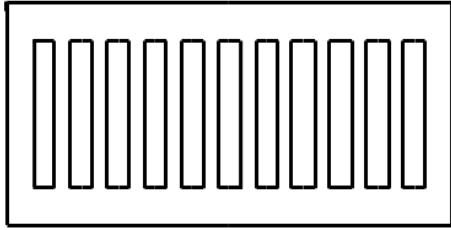


Рис. 1.11. Тест-об'єкт з прямокутним розподілом яскравості.

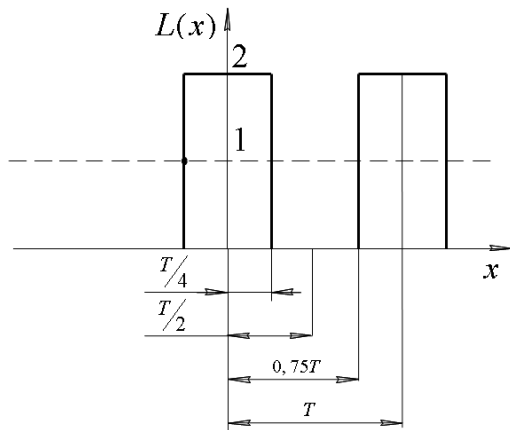


Рис.1.12 Закон розподілу яскравості тест-об'єкта.

Закон розподілу яскравості при використанні прямокутних мір в частотному вигляді представляється декількома гармонійними складовими. Їх можна описати таким чином:

$$L(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left( \cos(2\pi \cdot \nu \cdot x) - \frac{1}{3} \cos(2\pi \cdot 3\nu \cdot x) + \frac{1}{5} \cos(2\pi \cdot 5\nu \cdot x) - \dots \right) \quad (1.7)$$

У площині зображення в частотному вигляді закон розподілу освітленості в цьому випадку виглядає таким чином:

$$E(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') \cos(2\pi \cdot \nu' \cdot x') - \frac{1}{3} T(3\nu') \cos(2\pi \cdot 3\nu' \cdot x') + \frac{1}{5} T(5\nu') \cos(2\pi \cdot 5\nu' \cdot x') - \dots \right) \quad (1.8)$$

При цьому вважається що ФПФ оптичної системи що досліджується дорівнює нулю. Тоді всі гармоніки мають максимальні амплітуди при  $x'=0$ , а мінімальні при  $x' = \frac{1}{2\nu'}$ . При цих значеннях  $x$  всі косинуси у формулі (1.8) дорівнюють відповідно +1 та -1, тоді отримаємо:



$$E(x'=0)_{\max} = 1 + \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3}T(3\nu') + \frac{1}{5}T(5\nu') - \dots \right) \quad (1.9)$$

$$E\left(x' = \frac{1}{2\nu'}\right)_{\min} = 1 - \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3}T(3\nu') + \frac{1}{5}T(5\nu') - \dots \right) \quad (1.10)$$

Коефіцієнт передачі контрасту на кожній просторовій частоті дорівнює:

$$T_{\Pi}(\nu') = \frac{E(x')_{\max} - E(x')_{\min}}{E(x')_{\max} + E(x')_{\min}} \quad (1.11)$$

Якщо зробити обчислення відповідно до виразу (1.11), то коефіцієнт передачі контрасту по прямокутній світлі визначиться із співвідношення:

$$T_{\Pi}(\nu') = \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') - \frac{1}{3}T(3\nu') + \frac{1}{5}T(5\nu') - \dots \right) \quad (1.12)$$

Використовуючи результати виміру функції передачі модуляції по прямокутних мірах з просторовими частотами  $T_{\Pi}(\nu')$ ,  $T_{\Pi}(3\nu')$ ,  $T_{\Pi}(5\nu')$  можна відповідно до формули Колтмена, за цими даними порахувати функцію передачі модуляції для синусоїдальної світлі на просторовій частоті  $\nu'$  по формулі:

$$T_s(\nu') = \frac{4}{\pi} \left( T(\nu') + \frac{1}{3}T(3\nu') - \frac{1}{5}T(5\nu') - \dots \right) \quad (1.13)$$

Очевидна перевага методу - значення МПФ для даної частоти вимірюється безпосередньо. Недолік цього методу вимірів полягає в трудомісткості і неможливості отримувати результати в реальному масштабі часу [2].

### ***Установки з гармонійним аналізом електричного сигналу***

До цих установок відносяться спеціалізовані стенди, які призначені для виміру ОПФ оптичних систем в широкому діапазоні їх фокусних відстаней і полів зору. Періодична ґратка тест - об'єкта або аналізатор пересуваються рівномірно або по визначеному закону. При цьому виконується гармонічний аналіз зображення тобто автоматично вимірюються амплітуди і фази змінних складових електричного сигналу для різних просторових частот. Схема такої установки представлена на рис. 1.13 [2].

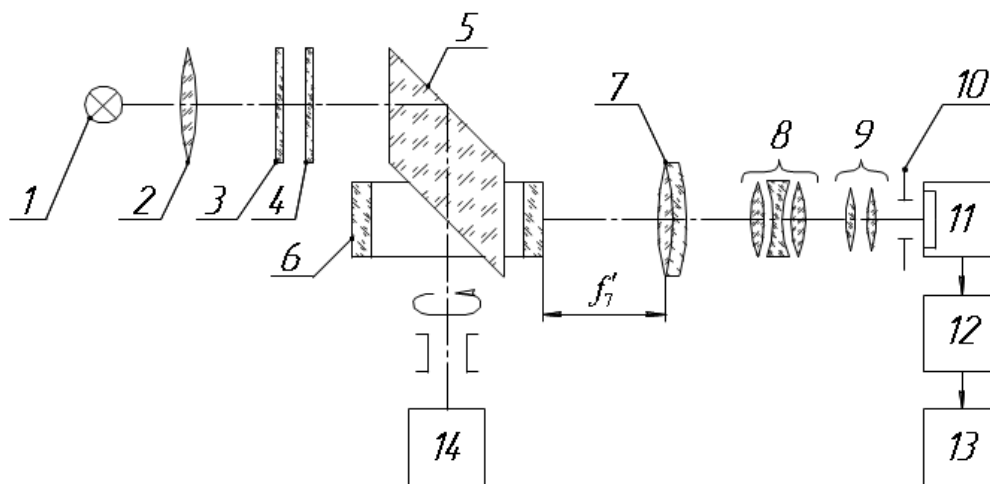


Рис. 1.13. Схема установки з гармонійним аналізом електричного сигналу.

Установка містить: 1—джерело випромінювання; 2—конденсор; 3—світлофільтр; 4—молочне скло; 5—призма-ромб; 6— барабан, що обертається; 7—колімаційний об'єктив; 8—випробовуваний об'єктив; 9— проекційний мікрооб'єктив; 10—аналізуюча щілина; 11—фотоприймач (частіше усього ФЕУ); 12—підсилювач; 12—аналізатор гармонік електричного сигналу; 13—стабілізований привід обертання дзеркального барабана [2].

Дзеркальний барабан є циліндром, по твірній якого нанесені вузькі прямокутні прозорі штрихи у вигляді діафрагм. Крок штрихів  $T$  багато більше, ніж ширина штриха  $b$ . Закон розподілу яскравості, якщо узяти розгортку цього барабана, представлено на рис. 1.14 [2].

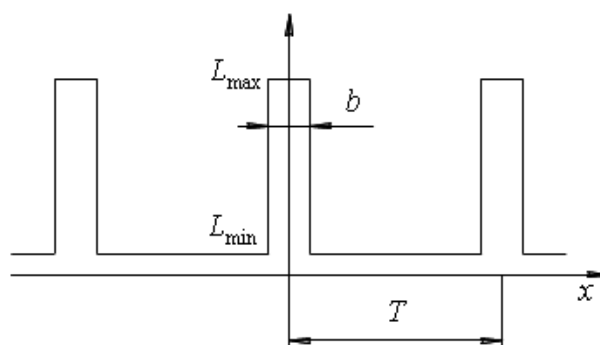


Рис. 1.14. Закон розподілу яскравості дзеркального барабана.

У комплект установки входять три змінні барабани із співвідношенням  $\frac{b}{T} = \frac{1}{100}, \frac{1}{50}, \frac{1}{25}$ . Ширина штриха у всіх циліндрах однакова і дорівнює  $b = 0,02$  мм.

Такій конструкції барабана відповідають просторові частоти  $\nu = 0,55; 1,1; 2,2$  ліній на міліметр.

При обертанні барабана перед аналізуючою діафрагмою 10 пробігає ланцюжок функцій розсіювання. В цьому випадку електричний сигнал фотоприймача містить змінні складові як основної частоти  $f_1$ , тобто частоти слідування штрихів так і сигнали більш високих часових частот кратних до основної  $2f_1, 3f_1$  і т.д. [2].

Зв'язок між електричними частотами електричного вихідного сигналу і просторовими оптичними частотами має наступний вигляд:

$$f_{эл} = \nu \cdot V, \quad (1.14)$$

де  $\nu$  – просторова частота;  $V$  - лінійна швидкість переміщення поверхні барабана.

Першій гармоніці сигналу відповідає просторова частота в зображенні  $\nu = \nu_1 f_1 / f_2$ , де  $f_1$  і  $f_2$  фокусні відстані відповідно коліматорного і випробуваного об'єктивів. А більш високим гармонікам сигналу можна поставити у відповідність кратні просторові частоти  $2\nu, 3\nu$  і т.п.

Аналізатор гармонік 13 (рис.8) визначає амплітуди і фази усіх електричних складових вихідного сигналу, а потім з використанням співвідношення (1.14) переходять до просторових оптичних частот [2].

### ***Установки контролю якості зображення з неперіодичним тест-об'єктом***

Такі установки також використовують сканування зображення, що будується оптичною системою яка випробується. Відмінністю від попередніх установок є те, що в них використовуються неперіодичний тест-об'єкти у вигляді точки, що світиться, або лінії. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії, що світиться показано на рис.1.15 [2].

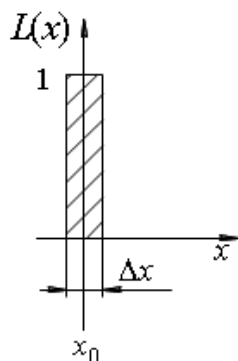


Рис. 1.15. Розподіл яскравості тест-об'єкта у вигляді лінії, що світиться.

При цьому вважається що  $\Delta x \rightarrow 0$ . Такий закон розподілу яскравості має назву *одиничного імпульсу*. Функція  $L(x)$  називається *дельта-функцією* і позначається  $\delta(x)$ . Вона дорівнює нулю в усіх випадках, крім випадків, коли точка  $x = x_0$ . При цьому площа імпульсу вважається кінцевою і дорівнює одиниці:

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

Умова нормування має наступний вигляд:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (1.16)$$

Спектр цієї функції з урахуванням перетворення Фур'є має наступний вигляд:

$$\tilde{L}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x) e^{-2\pi\nu x} dx \quad (1.17)$$

Враховуючи можливість розкладання  $e^{-j2\pi\nu x}$  з використанням формули Ейлера можна дійти висновку, що модуль оптичної передатної функції міститиме косинус-гармоніки, значення яких при  $x=0$  рівні 1 для усіх просторових частот  $\cos(2\pi \cdot \nu \cdot x)$ . Тобто спектр цієї функції містить усі гармоніки з амплітудою, рівною 1, а фазова характеристика такого сигналу дорівнює 0 для усіх просторових частот (рис. 1.16). Схема установки з неперіодичним тест – об'єктом представлена на рис.1.17.

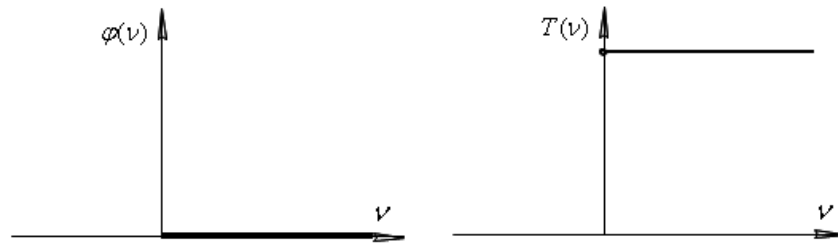


Рис.1.16. Спектральні характеристики одиничного імпульсу.

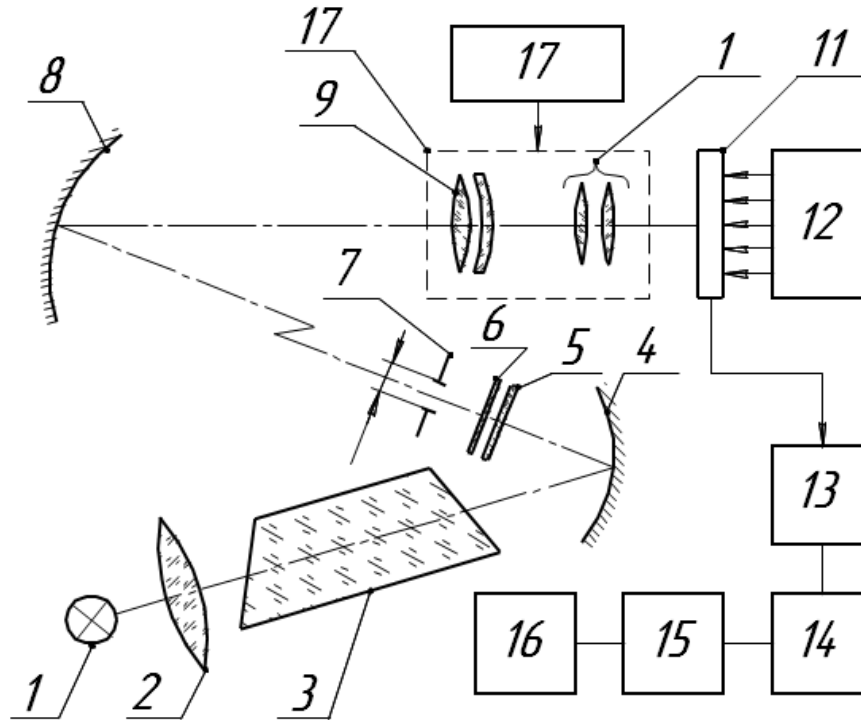


Рис.1.17. Схема установки з неперіодичним тест - об'єктом.

Установка містить наступні елементи: 1–джерело випромінювання (галогенна лампа або глобар); 2–конденсор; 3– призма Дове (призначена для обертання зображення джерела випромінювання при розташуванні щілини 7 в горизонтальній або вертикальній площинах при визначенні якості зображення в меридіональній і сагітальній площинах); 4–дзеркальний конденсор; 5–набір змінних світлофільтрів, розрахованих на спектральні діапазони роботи випробовуваних об'єктивів; 6–світлорозсіювач (молочне скло); 7–вузол щілинної діафрагми з можливістю її розвороту в горизонтальну і вертикальну площини; 8– коліматорний (дзеркальний) об'єктив з фокусною відстанню  $f' = 3,5\text{м}$ ; 9– випробовуваний об'єктив; 10–проекційний мікрооб'єктив; 11– фотоприймач; 12– електронний блок; 13–формувавч відеосигналу; 14–аналого-цифровий перетворювач; 15–інтерфейс; 16–комп'ютер, що виконує дискретне

перетворення Фур'є і документує результати виміру; 17–поворотний стіл для оцінки якості зображення по центру і по краях поля зору [2].

При проектуванні подібних установок враховують, що безперервні сигнали, що мають обмежений спектр цілком визначаються кінцевим числом значень на протяжному кінцевому інтервалі. Це положення знаходить підтвердження в теоремі Котельникова, яка формулюється таким чином : якщо функція  $E'(x')$  не містить частот більших ніж  $\nu_{\max}$  то вона повністю визначається шляхом завдання її координат в послідовних точках, віддалених одна від одної на відстань  $T = \frac{1}{2\nu_{\max}}$ . Значення  $\nu_{\max}$  може бути розраховане заздалегідь на підставі конструктивних параметрів випробовуваного об'єктиву з формули [2]:

$$\nu_{\max} = \frac{D}{\lambda \cdot f'}, \quad (1.18)$$

де  $D$  - діаметр входної зіниці об'єктиву;  $f'$  - фокусна відстань об'єктиву; довжина хвилі.

При застосуванні в якості фотоприймача багатоеlementної ПЗЗ лінійки необхідно вибрати збільшення мікрооб'єктиву згідно із співвідношенням:

$$\beta \geq \nu_{\max} \cdot 2t, \quad (1.19)$$

де  $t$  - період дотримання пікселів ПЗЗ лінійки.

В ході проектування стенду необхідно розраховувати допустиму ширину щілини тест-об'єкта. Якщо прийняти, що амплітудний спектр тест-об'єкта на просторовій частоті  $\nu_{\max}$  має амплітуду що відрізняється від одиниці менш ніж на 5%, то вважають, що ширина діафрагми задовольняє умовам виміру, і її розмір визначається із співвідношення [2]:

$$d \leq 0,95\lambda \frac{f'_{\text{кол}}}{D}, \quad (1.20)$$

де  $f'_{\text{кол}}$  фокусна відстань коліматорного об'єктива.

### **Телевізійні методи контролю ОПФ**

Телевізійні методи опираються на ту ж теоретичну базу, що і скануючі. Зазвичай приймач розміщують у фокальній площині системи, яка тестується. Якщо в якості джерела використовують точкову діафрагму, то ФРТ може бути прямо отримана з оцифрованого відео-виходу. Двовимірний ОПФ отримується прямим перетворенням Фур'є цих даних по двом координатам. ФРЛ можна отримати інтегруванням ФРТ. Якщо використано джерело-щілину, функція розсіювання лінії отримується безпосередньо, а ОПФ розраховується як її одновимірне перетворення Фур'є. МПФ є модулем ОПФ.

Переваги телевізійних методів контролю якості зображення такі:

- управління яскравістю, контрастом і структурою зображення;
- усунення впливу вібрацій на якість зображення;
- можливість узгодження телевізійних камер з комп'ютером;
- можливість дистанційного контролю;
- оперативність методу (можливість роботи в реальному часі).

Нині відомі установки, що працюють з телевізійною камерою, і призначені для контролю якості мікрооб'єктів. Одна з проблем, яка виникає при проектуванні таких установок, полягає в узгодженні динамічного діапазону по чутливості телевізійних камер (2-3 порядки) з необхідним динамічним діапазоном для фотометрирування функції розсіювання (4-5 порядків)[2].

Для узгодження динамічних діапазонів застосовуються 2 методи:

- метод замикання електронного променя зчитування;
- метод телевізійного ізофотометра.

#### ***Метод замикання електронного променя зчитування***

Схема установки для контролю якості оптичних систем із застосуванням методу замикання електронного променя зчитування представлена на рис.1.18.

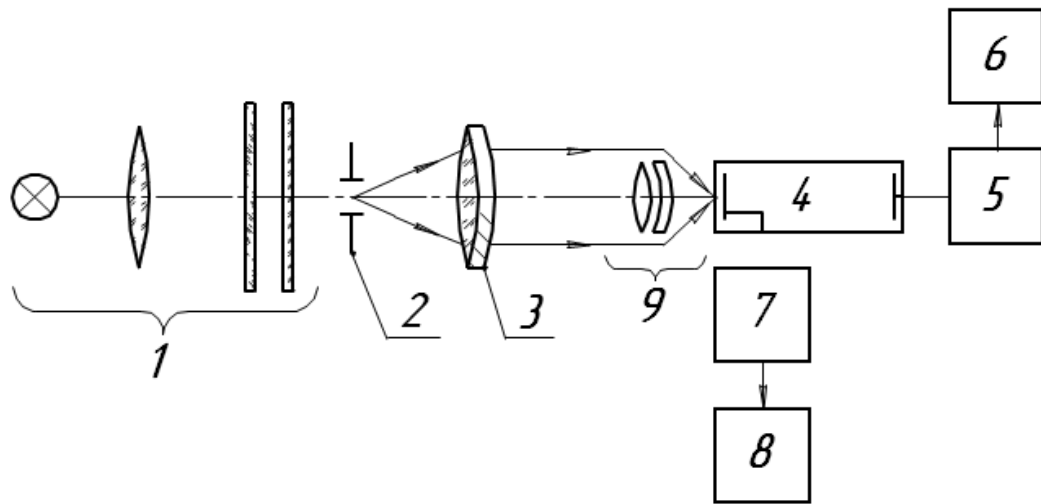


Рис.1.18 Схеми установки для контролю якості оптичної системи із застосуванням замикання електронного променя зчитування.

Установка містить наступні елементи: 1—освітлювальний пристрій, що включає джерело випромінювання, конденсор, набір світлофільтрів, молочне скло; 2— тест-об'єкт; 3—коліматорний об'єктив; 4— електронно-променева трубка; 5—пристрій запирання електронного променя зчитування; 6— реле часу; 7—відіопідсилювач; 8—блок виділення контуру зображення; 9— об'єктив що випробується .

Принцип дії установки наступний. Оптичне зображення точкової діафрагми 2, яке підсвічує освітлювачем 1, до складу якого входить світлофільтр, конденсор, молочне скло, будується випробовуваною оптичною системою 9 в площині фотокатода відікону 4. У телевізійному каналі формується відеосигнал, що відповідає зображенню фотометричного перерізу [2].

Фотометричний переріз - це кільцева зона в площині зображення з однаковим рівнем освітленості. Для отримання системи фотометричних перерізів в зображенні точки, що світиться, необхідно утворити ряд перерізів, розташованих на рівнях відносної освітленості, пов'язаних певними математичними співвідношеннями.

Найчастіше вибирають рівні освітленості, розташовані згідно із законом

$$E_{відн} = 2^{-i}, \quad (1.21)$$



де  $i$  - порядковий номер ізофоти.

Така система фотометричних перерізів показана на рис.1.19.

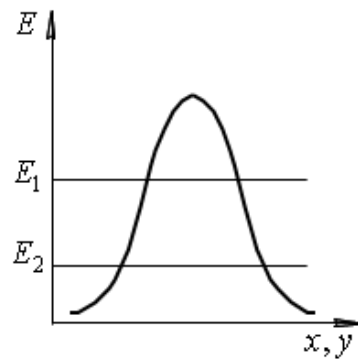


Рис.1.19. Система фотометричних перерізів.

Треба врахувати, що експозиція в перерізах з рівнями освітленості  $E_1$  і  $E_2$  дорівнює:

$$H_1 = E_1 t_1; \quad H_2 = E_2 t_2 \quad (22)$$

де  $t_2, t_1$  час експозиції.

Для того, щоб зрівняти експозиції при різних рівнях освітленості  $E_2$  і  $E_1$ , необхідно, щоб  $H_1 \approx H_2 \Rightarrow t_2 > t_1$ .

Отримання необхідної системи перерізів робиться введенням в телевізійну систему блоку замикання електронного променя зчитування, включеного в ланцюг катоду відікона. Включений в катодний ланцюг відікона 4, транзисторний ключ блоку 5 замикає, управляється сигналом, що приходить від реле часу 6.

У початковому стані транзистор відкритий. При цьому катод відікона 4 знаходиться під нульовим потенціалом. Електронний промінь прочитування відікона відкритий. Він сканує фотокатод і знімає з нього заряд. При замиканні ключа на фотокатоді відікона накопичується електричний заряд, пропорційний величині експозиції і формуючий зображення фотометричного перерізу. Після відмикання ключа відбувається прочитування сигналу з фотокатода. Телевізійний сигнал з фотокатода через відіопідсилювач 7, подається на блок 8 виділень контуру зображення. Проміжки часу накопичення вибираються так, щоб кожна наступна експозиція була удвічі більше попередньої [2].

Основний недолік цього методу полягає в тому що один цикл вимірювання відбувається на протязі десятків хвилин, що не дозволяє робити вимірювання в реальному масштабі часу.

### **Метод телевізійного ізофотометра**

При використанні цього метода графічна інформація виводиться на екран електронно-променевої трубки практично одночасно з процесом аналізу зображення. Для цього в оптичну схему вводиться фотометричний клин. Який може пересуватися в площині перпендикулярній до оптичної осі. Схема установки, що реалізує метод телевізійного ізофотометра, показана на рис.1.20.

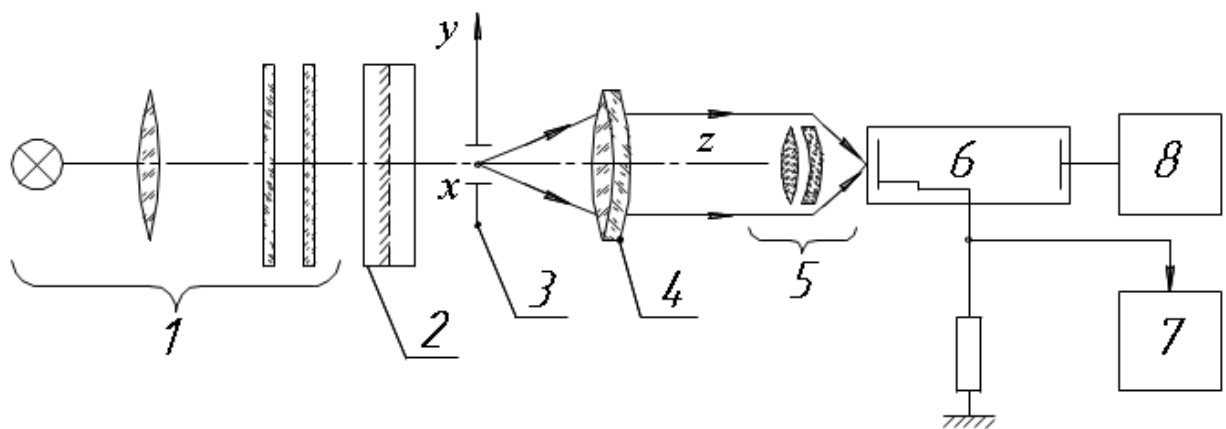


Рис.1.20. Схема установки, що реалізує метод телевізійного ізофотометра.

Установка містить наступні елементи: 1—освітлювач; 2—фотометричний клин зі змінною оптичною щільністю по координаті  $X$ ; 3—щілинна діафрагма; 4—коліматорний об'єктив; 5—випробовуваний об'єктив; 6—відікон; 7—блок обробки сигналу з мікропроцесором; 8—блок живлення відікона.

На цьому стенді вимірюється функція розсіювання лінії. Графік функції розсіювання отримують таким чином: в зображення щілини 3, побудованому випробовуваною оптичною системою 5, розподіл освітленості уперек зображення (у напрямі осі  $y$ ), отримують відповідно до функції розсіювання, а розподіл освітленості уздовж зображення (уздовж осі  $x$ ) отримують з урахуванням коефіцієнта пропускання клину.

Пропорційно зниженню максимальної освітленості в кожному перерізі знижуються і усі інші значення освітленості. При цьому вид функції розсіювання лінії буде мати вигляд наведений на рис.1.21.

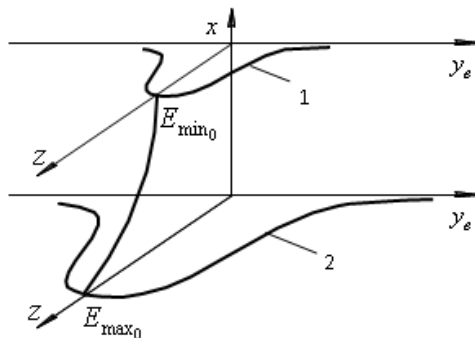


Рис.1.21 Вид функції розсіювання лінії при застосуванні фотометричного клина.

При фотометруванні функції розсіювання мінімальне значення освітленості на краю функції розсіювання визначається в перерізі 2, а максимальне значення освітленості визначається в перерізі 1. Таким чином зменшується перепад між максимальним і мінімальним значеннями освітленості в функції розсіювання, що дозволяє користуватись фотоприймачами з реальними значеннями динамічного діапазону. Подальший вид функції розсіювання визначають з урахуванням коефіцієнта пропускання клину.

### **Метод Фуко(knife-edge method) [3].**

Один з найпоширеніших методів аналізу якості оптичних систем[X]. Дозволяє виміряти МПФ системи, використовуючи знімки зображення непрозорого екрану з гострою кромкою(ніж Фуко або оптичний ніж), який послідовно переміщується в певному напрямі. Схема установки, яка реалізує метод, зображена на рис. 1.22.

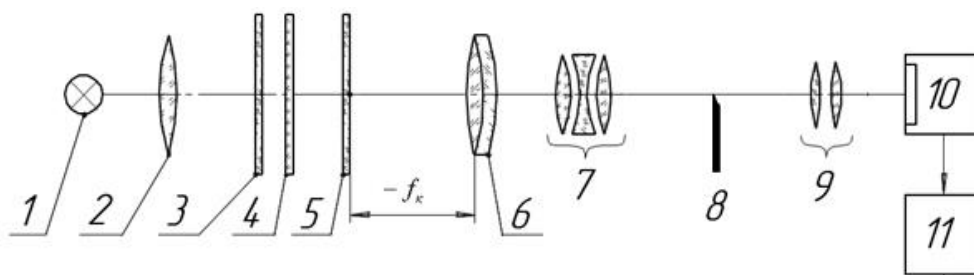


Рис. 1.22. – Схема для вимірювання МПФ за допомогою оптичного ножа.

Основні елементи установки: коліматор(1-6), 7 - тестований об'єктив, 8 – оптичний ніж, 9 - збільшувальна система, 10 - приймач випромінювання, 11 - ЕОМ. Коліматор складається з точкової діафрагми 5, яка рівномірно освітлюється через молочне скло 4 і світлофільтр 5 джерелом 2 і розміщена в

фокальній площині коліматорної лінзи 6. Випромінювання з коліматора проходить через об'єктив, який тестується 7. Зображення, яке створює цей об'єктив, сканується оптичним ножом 8, що переміщується в одному напрямі. Світло, що проходить далі, фокусується системою 9 та направляється на приймач 10. Сигнал з приймача, як функція позиції оптичного ножа є одновимірною ФРК. Похідна ФРК по координаті дає ФРЛ, а перетворення Фур'є ФРЛ дозволяє розрахувати ОПФ. Модуль ОПФ, як зазначено раніше, це МПФ. Даний розрахунок виконує ЕОМ 11.

МПФ розрахована таким чином не є істинною, через скінченність розмірів точкової діафрагми. Отримати реальне значення МПФ для діаметру діафрагми а можна діленням нескоректованої МПФ на перетворення Фур'є точкової діафрагми.

### **Когерентно-оптичні методи [4]**

Особливістю і перевагою цих методів є отримання двовимірної ОПФ, тобто значення МПФ та фазового зсуву можуть спостерігатися та реєструватися не тільки для різних просторових частот, але і для всіх азимутальних напрямів по полю зору досліджуваної системи.

Однак цим методам властивий принциповий недолік. Оскільки вони використовують джерела когерентного випромінювання(частіше лазери), то можливо виміряти тільки монохроматичні ОПФ і лише для тих довжин хвиль, на яких працюють лазери. Приклади когерентно-оптичних методів: голографічний, дифрактометричний.

### **Дифрактометричний метод**

Метод безпосередньо базується на тому, що ОПФ є перетворенням Фур'є від функції розсіювання системи. У дифрактометрах використовується зв'язок між комплексними амплітудами на сфері, яка розташована у площини зіниці оптичної системи і в площині зображення. Цим методом вимірюється МПФ системи, причому, вимірювання відбуваються у два етапи. Схема методу наведена на рис. 1.23.

Спочатку за некогерентного освітлення точкової діафрагми, на фотографічному матеріалі реєструють її зображення, яке буде досліджувана система, тобто ФРТ. Фотоматеріал проявляють таким чином, щоб його амплітудне пропускання при наступному освітленні змінювалося за законом функції розсіювання.

Потім отриманий фотографічний транспарант освітлюють плоскою монохроматичною хвилею лазера. За або перед транспарантом розміщують об'єктив, у фокальній площині якого реєструється дифракція Фраунгофера на функції розсіювання, тобто ОПФ. У площині зображення за допомогою фотоелектричного приймача реєструється інтенсивність  $I(x, y)$ , яка рівна квадрату модуля ОПФ. Віддалення від центру картини по будь-якому напрямі (азимуті) пропорційно просторовій частоті.

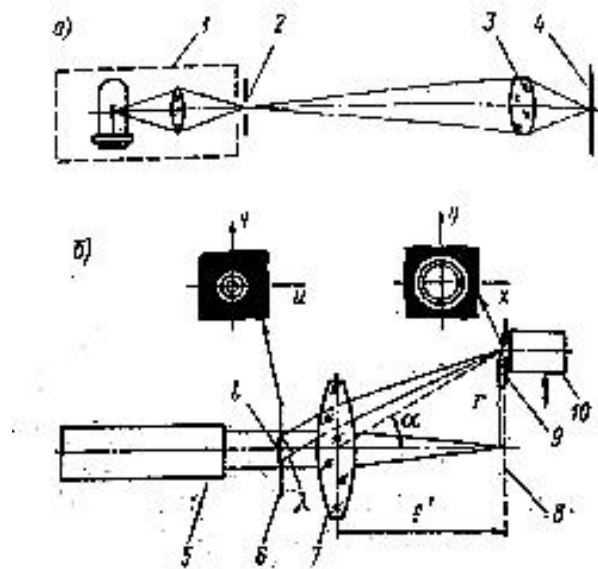


Рис.1.23. - Дифрактометричний метод вимірювання МПФ: а – отримання функції розсіювання точки; б – отримання спектру просторових частот функції розсіювання;

1 – освітлювач; 2 - мала діафрагма; 3 - система, яка досліджується; 4 - фотоматеріал; 5 – лазер; 6 - транспарант; 7 - дифрактометричний об'єктив; 8 - площина спектру просторових частот; 9 - рухома діафрагма; 10 - фотоприймач.

Дійсно, в площині кресленника рис.2.б., при дифракції світла з довжиною хвилі  $\lambda$  на деталях транспаранта, що мають розмір  $l$  (відповідно, просторова

частота  $N = 1/l$ ), напрям променів на перший дифракційний максимум складе з віссю кут  $\alpha \approx \lambda/l$ . Відхилені на кут  $\alpha$  пучки фокусуються об'єктивом на відстані від осі, яка пропорційна  $N$ , так як

$$r = f' \tan \alpha \approx f' \alpha = \frac{f' \lambda}{l} = \lambda f' N \quad (1.23)$$

Практична реалізація цього способу стикається зі значними складнощами, в основному, при фотографічній обробці транспаранта. При малих розмірах функції розсіювання, які складають соті долі міліметра, необхідно точно витримати значення коефіцієнта контрастності фотоматеріалу в широкому діапазоні зміни пропускання (зміна  $10^3$ - $10^4$  разів від центру до периферії).

## Розділ 2. Математична модель цифрової камери

### 2.1. МПФ цифрових камер

Модуль ОПФ  $T(v')$  має назву *модуляційна передатна функція (МПФ)*. Вона може бути отримана з математичного рівняння процесу формування зображення. Це рівняння встановлює залежність між розподілом освітленості в площині зображення, якістю оптичної системи і розподілом яскравості в площині предмета. Виглядає це рівняння таким чином:

$$E(x', y') = \pi \tau \cdot \sin^2 U \iint_{-\infty}^{\infty} A(x' - x'_1, y' - y'_1) \cdot L\left(\frac{x'_1}{\beta}, \frac{y'_1}{\beta}\right) dx'_1 dy'_1, \quad (2.1)$$

де  $E(x', y')$  - функція, що характеризує розподіл освітленості в площині зображення в поблизу точки з координатами  $x', y'$ ;  $\tau$  - коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $U$  - апертурний кут оптичної системи в площині зображення;  $A(x' - x'_1)(y' - y'_1)$  - функція розсіювання оптичної системи;  $x'_1, y'_1$  - змінні координати поблизу точки з координатами  $x', y'$ ;  $L\left(\frac{x'_1}{\beta}, \frac{y'_1}{\beta}\right)$  - функція, що

характеризує яскравість в площині предмета в точці з координатами  $\frac{x'_1}{\beta}$  і  $\frac{y'_1}{\beta}$  ;

$\beta$  - збільшення оптичної системи.

Інтеграл (2.1) справедливий для лінійних і інваріантних (ізопланарних) оптичних систем. Система вважається лінійною, якщо її реакція на одночасну дію декількох сигналів дорівнює сумі реакцій на кожен сигнал окремо. Система вважається інваріантною, якщо імпульсний відгук системи залежить тільки від відстані між точками і не залежить від положення початку системи координат. Система изопланарна або інваріантна, якщо її коло розсіювання однакове по усьому полю зображення.

Інтеграл (2.1) є згортком функцій  $A$  і  $L$ . Виконавши *перетворення Фур'є*, можна перейти від лінійних координат до просторових частот і отримати вираз (18) в частотному виді:

$$\tilde{E}(v'_x, v'_y) = \tilde{A}(v'_x, v'_y) \times \tilde{L}\left(\frac{v'_x}{\beta}, \frac{v'_y}{\beta}\right), \quad (2.2)$$

де  $\tilde{E}(v'_x, v'_y)$ ,  $\tilde{A}(v'_x, v'_y)$  і  $\tilde{L}\left(\frac{v'_x}{\beta}, \frac{v'_y}{\beta}\right)$  - перетворення Фур'є відповідних функцій;

$v'_x, v'_y$  - просторові частоти, рівні зворотньому значенню періоду синусоїдальної зміни освітленості в просторі зображення по двох координатах.

Математично ОПФ є результатом Фур'є-перетворення функції розсіювання. Наприклад, Фур'є перетворення функції розсіювання для двовимірного об'єкту (точка, що світиться) наступне :

$$\tilde{A}(v'_x, v'_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x', y') \cdot e^{-j \cdot 2\pi(v'_x \cdot x' + v'_y \cdot y')} dx' dy' . \quad (2.3)$$

Для подальших перетворень можна скористатися формулою Ейлера , розклавши експоненту на косінус і синус складові :

$$e^{-j\omega x} = \cos(\omega \cdot x) - j \sin(\omega \cdot x) . \quad (2.4)$$

З урахуванням рівняння (2.3) для одновимірного об'єкту (тест-об'єкт – лінія, що світиться), перетворення Фур'є функції розсіювання виглядатиме таким чином:

$$\tilde{A}(v') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \cos(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' - j \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \sin(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' \quad (2.5)$$

У співвідношенні (2.5) існують дійсна і уявна частини, що є відповідно косінус і синус Фур'є-перетвореннями :

$$T_c(v') = \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \cos(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' \quad (2.6)$$

– дійсна частина;

$$T_s(v') = -j \int_{-\infty}^{\infty} A(x') \sin(2\pi \cdot v' \cdot x') dx' \quad (2.7)$$

– уявна частина.

З урахуванням цього визначити ОПФ можна на основі співвідношення:

$$\tilde{A}(v') = T_c(v') - T_s(v') . \quad (2.8)$$



Тоді МПФ, як модуль ОПФ можна представити:

$$|\tilde{A}(\nu')| = T(\nu') = \sqrt{T_c(\nu')^2 + T_s(\nu')^2} \quad (2.9)$$

Фізично модуль ОПФ показує, з яким контрастом оптична система відтворює різні просторові частоти. Його інколи називають частотно-контрастною характеристикою, яка може бути визначена із співвідношення:

$$T(\nu') = \frac{k_1}{k_2}, \quad (2.10)$$

де  $k_1$  - контраст в площині зображення на просторовій частоті  $\nu'$ ;  $k_2$  - контраст в площині предметів на тій самій просторовій частоті.

Приклад графіку МПФ зображено на рис. 2.1 . Просторові частоти тут представлені у циклах на піксель, де циклом вважається пара ліній-світла і темна. Максимальне значення обмежено частотою Найквіста, яка відповідає 0.5 циклам на піксель.

Наприклад, відповідно до графіку, порівняння кривих **a**, **b**, **c** дозволяє зробити висновки, що система **a** має найгіршу МПФ, система **c** – МПФ, кращу, за систему **a**, а система **b** – високе значення передачі модуляції на низьких просторових частотах і порівняно низьке на високих.

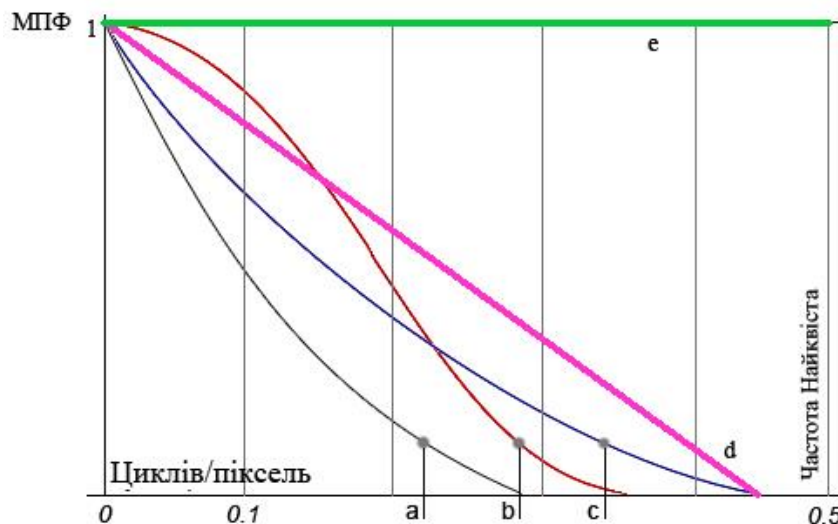


Рис.2.1. Приклад графіку модуляційно-передатних функцій систем.

Абсолютно всі оптичні системи мають МПФ, яка далека від ідеальної системи (крива «e», рис.ХХ.). Найбільш реальні значення до яких варто

прагнути при проектуванні оптичних систем – значення МПФ для дифракційно обмежених систем, наприклад, крива «d», рис.ХХ.

Очевидні переваги МПФ, перед іншими якісними характеристиками оптичних систем:

- можливість просто отримати характеристику результуючої системи, знаючи характеристики елементів, які її утворюють;
- об'єктивність, незалежність від кваліфікації дослідника;
- сучасні швидкі прості методи розрахунку, наприклад, метод похилої півплощини(так званий *slanted-edge method*).

## 2.2. Будова сучасних цифрових камер

**CCD сенсор.** CCD - матриця (скорочено від «Charge Coupled Device») або ПЗЗ – матриця (скорочено від «пристрій з зарядовим зв'язком») є одним з основних елементів цифрових фотоапаратів і фотокамер. Пристрій з зарядовим зв'язком являє собою однорядкову або двовимірну матрицю, кожен елемент якої є мініатюрним електричним конденсатором типу метал-оксид-напівпровідник (МОН) (рис.2.1) [5].

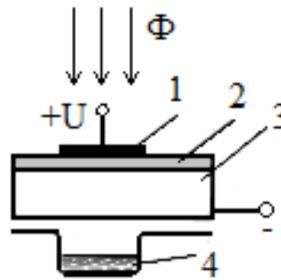


Рис. 2.1.

Елемент ПЗЗ – електричний конденсатор типу МОН: 1 – металевий електрод; 2 – діелектрик; 3 – напівпровідник р - типу; 4 – потенціальна яма, що сформувалася біля площини розділу між діелектриком та напівпровідником під впливом прикладеного до електрода імпульсу позитивної напруги [5].

В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекту. При освітленні структури світловим потоком  $\Phi$  в напівпровіднику генеруються пари носіїв заряду — електрон і дірка. Під дією позитивної напруги (+U) дірки

витісняються в глиб напівпровідника, а неосновні носії заряду, електрони, накопичуються в потенціальній ямі. Тут вони можуть зберігатися достатньо тривалий час, оскільки дірок в збідненій області немає і електрони не рекомбінують. Електроди виготовлені з полікристалічного кремнію, який є прозорим майже у всьому видимому діапазоні. Якщо два мініатюрних конденсатори розмістити один біля одного так, щоб їх електричні поля впливали один на одного, потенціальні ями двох конденсаторів стануть зв'язаними, а накопичений заряд потече в більш глибоку потенціальну яму. Таке перетікання зарядів складає основу принципу дії пристроїв з зарядовим зв'язком [5].

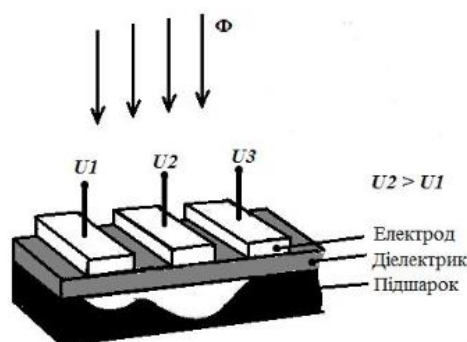


Рис. 2.2. Елемент трифазного ПЗЗ

На рис. X показана структура одного елемента, лінійного трифазного ПЗЗ. Заряд, нагромаджений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал ( $U_2$ ) буде збільшений, тоді як потенціал ( $U_1$ ) першого електроду буде зменшений. Перенесення в трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямів (ліворуч або праворуч). Всі зарядові пакети лінійки переносяться в той же бік одночасно [5].

Двовимірний масив (матрицю) пікселів отримують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗЗ на стовпці. Стоп-канали – це вузькі області, що формуються спеціальними технологічними прийомами в поверхневій області, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних областей – області накопичення і області зберігання. Пристрій схематично показаний на рис. 2.3.

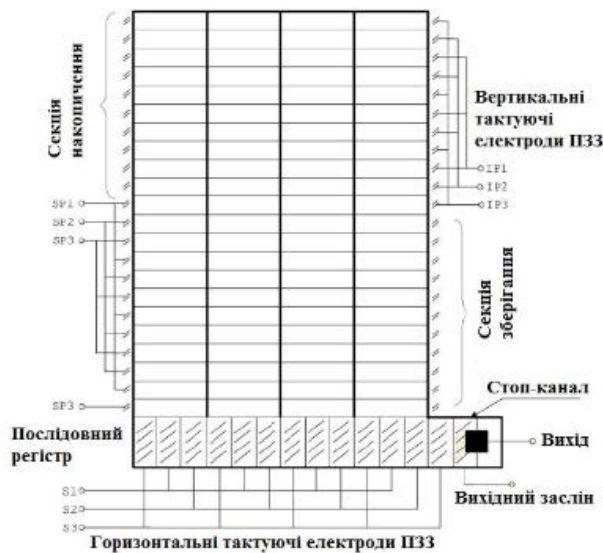


Рис. 2.3. Структура ПЗЗ матриці

Область зберігання захищена від дії світла світлонепроникним покриттям. Зарядовий рельєф, сформований в області накопичення, швидко переноситься в область зберігання і, потім, поки експонується наступний кадр, зчитується порядково у вихідний зсуваючий (послідовний) регістр. З послідовного регістра зарядові пакети виводяться один за одним послідовно через вихідний підсилювач, розташований на цьому ж кристалі. У цьому вузлі відбувається перетворення заряду в напругу для подальшої обробки сигналу зовнішньою електронною апаратурою [5].

Принцип кольоровості ПЗЗ Набір сенсорів ПЗЗ-матриці відображає рівень яскравості різних ділянок зображення і на виході формується чорно-біле зображення. Для формування кольорового зображення на сенсор накладається світлофільтр. Розподіл таких світлофільтрів по поверхні матриці утворює масив кольорових фільтрів. Принцип дії кольорового фільтру дуже простий: він пропускає світло тільки певного кольору (інакше кажучи, тільки світло з певною довжиною хвилі). Будь-який колірний відтінок можна отримати змішуванням в певних пропорціях декількох основних (базових) кольорів. У найбільш популярній адитивній моделі RGB (Red, Green, Blue) таких кольори три: червоний, зелений і синій. Колірна модель RGB не єдина, але в переважній більшості цифрових камер використовують саме її [5].

## Основні параметри ПЗЗ матриць

Кількість пікселів матриці (Array Format). Цей параметр характеризує роздільну здатність датчика. Чим більше пікселів, тим більш деталізованим буде зображення. Роздільна здатність визначається двома способами. По-перше, можна підрахувати загальне число пікселів (наприклад, якщо воно становить 1,5 мільйона, говорять про 1,5-мегапіксельну камеру). По-друге, можна вказати кількість стовпців і рядків ПЗЗ-матриці, що беруть участь у формуванні зображення (скажімо, 1360x1020) - це максимальний розмір кадру у пікселях, тобто число активних пікселів, які використовуються для одержання зображення. Різниця між цими двома показниками зазвичай не перевищує 5%. Існує кілька причин такої розбіжності. По-перше, в процесі сенсора створюються «темні», дефектні пікселі (створення повністю справного сенсора практично неможливо при існуючих технологіях). По-друге, деякі пікселі використовуються для інших цілей, наприклад, для калібрування сигналів сенсора. По-третє, на частину пікселів по краях світло не потрапляє. Ці пікселі допомагають визначити фоновий шум, який потім буде відніматися з сигналів активних пікселів [5].

Оптичний формат (Optical format). Оптичний формат - це розмір діагоналі активної області матриці фотоелементів в дюймах і приймає значення: 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4". Матриці великого формату 1", 2/3" практично перестали випускатися, оскільки камери на їх основі виходять дуже громіздкими і дорогими. Останні моделі ПЗС - матриць фірми "Sony" мають формат 1/4". На основі таких матриць деякі фірми випускають надмініатюрні камери. Але чим менший розмір матриці, тим менша чутливість (через малу площу пікселів) і при цьому ж вноситься більший рівень шумів, погіршуючи якість зображення. Розмір матриці важливий при визначенні кута огляду камери. З однаковими об'єктивами камера на основі матриці 1/2" має більший кут огляду, ніж камера з матрицею 1/3" [5].

Чутливість (Sensitivity). Під чутливістю розуміється відношення величини електричного сигналу, що формується датчиком, до рівня його освітленості в

даний момент. Величина електричного сигналу часто представляється у вольтах, а освітленість в лк/сек. Для кольорових датчиків зображення значення чутливості вказується окремо для різних довжин хвиль (монохроматична чутливість до потоку випромінювання шириною 1 нм). При обчисленні чутливості кожен виробник використовує свою власну методику, тому порівняння за цим параметром продукції різних вендорів часто є некоректним[5].

Квантова ефективність (Quantum Efficiency). Це відношення числа зареєстрованих фотонів до їх загального числа, що потрапило на світлочутливу область матриці. Цей параметр має дуже високе значення для CCD датчиків - у кращих зразків він досягає 95%. Для порівняння, квантова ефективність людського ока складає близько 1%, а високоякісних фотоемульсій не більше 3%[5].

Динамічний діапазон (Dynamic Range). Динамічний діапазон - це відношення максимального вихідного сигналу датчика до його власного рівня шуму. Цей параметр вказується, як правило, в дБ. Людське око має дуже великий динамічний діапазон - близько 200 дБ. Жоден штучний прилад не має такого високого значення цього параметра [5].

Відношення сигнал/шум (S/N ratio). Під відношенням сигнал/шум розуміється величина, рівна відношенню корисного відеосигналу до рівня шуму, виражена в дБ. Прийнятним відношенням сигнал/шум вважається величина не менше 50 дБ.[5].

**CMOS сенсор.** Додатковий метал оксидний напівпровідник (або Complementary metal oxide semiconductor (CMOS)) - це ще один тип датчиків зображення, що використовуються в цифрових камерах. Вони вперше з'явилися в 1993 році у Jet Propulsion Laboratory (JPL), яка виробляла CMOS сенсор з продуктивністю, порівнянною з науковими CCD-матрицями [6].

Як і в CCD, CMOS-датчики також складаються з світлочутливих елементів, які, як і CCD, утворені з сітки світлочутливих елементів, кожен з яких здатний виробляти електричний сигнал / заряд, пропорційний падаючому світлу. Проте процес досягнення цього дуже сильно відрізняється в сенсорах CMOS порівняно

з типом сенсора ПЗЗ. Раніше ми помітили, що ПЗЗ-піксель формується з упередженим р-н-з'єднанням, який створює потенційну яму, в якій заряд акумулюється протягом періоду інтеграції. CMOS піксель використовує фотодіод, конденсатор і до трьох транзисторів. Перед початком інтеграційного періоду конденсатор буде заряджатися до певної напруги. Коли починається період інтеграції, заряд на конденсаторі починає повільно протікати через фотодіод, з швидкістю стоку прямо пропорційною рівню падаючого світла. Наприкінці періоду інтеграції заряд, що залишився в конденсаторі, зчитується та оцифровується [X].

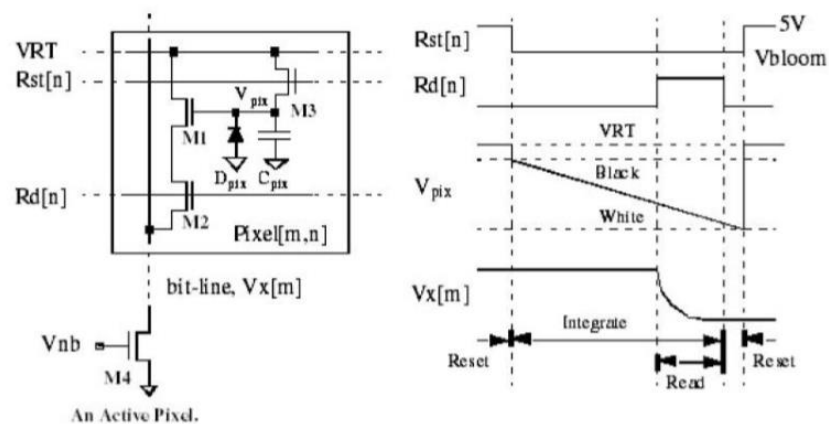


Рис. 2.4 Приклад активного пікселя, а також графіки напруги та часу, взяті з різних точок у пікселі [5].

**BSI сенсор** Попит на поліпшення роздільної здатності в системах обробки зображень зростає у таких галузях, як системи машинного зору та індустрії зображень промисловості.

До недавнього часу, через те, як виготовляються чіпи, більшість датчиків фотоапаратів накопичували світло внизу, з-під шарів взаємозв'язків. Причиною цього були менші витрати, пов'язані з їх високою сумісністю виробничої сумісності. Виробники були змушені зменшувати розмір пікселів, щоб обмежити витрати до мінімуму, таким чином обмежуючи ефективність датчиків зображення. Це є основною причиною, чому в ранніх продажах смартфонів були переважно передні освітлені датчики [6].

Нещодавнє впровадження датчиків заднього висвітлення (BSI) дозволило побудувати датчики з фотоприймаючим світлом. Основною рекламованою

перевагою є збільшення продуктивності з низьким освітленням. Ця технологія показала обіцянку щодо вдосконалення цифрових фотографій та відеоматеріалів про споживчі товари, починаючи від базових камер до дзеркальних фотокамер [9].

Основна ідея цих нових датчиків полягає в тому, що вони усувають світло, заблоковане електронними частинами, щоб покращити чіткість зображення. Sony і Nikon підтримують технологію BSI починаючи з 2009 року, включивши датчик CMOS із заднім освітленням Exmor R в декілька своїх продуктів [6].

В даний час структура датчиків зображення аналогічна структурі з людськими та найбільш тваринними очима таким чином, що світлочутлива частина знаходиться на бічній стороні далеко від світла. Це полегшує забезпечення циркуляції енергетично голодних стрижнів і конусів клітин, що знаходяться в біологічних очах, дозволяючи легко видаляти сміття з органу [6]. У випадку штучних датчиків кремній використовується як для чіпа, так і для перетворення фотонів у електричну енергію. Тому легше створювати світлочутливі ділянки в кресленні підкладки та складати електроніку зверху, залишаючи отвори в проводці над кожним фотонним (піксель), щоб пропускати світло. Однак, оскільки роздільна здатність камери збільшилася, розміри пікселів зменшилися, що призвело до того, що все більше і більше поверхні датчика покриваються проводами, що призводить до меншого і меншого світла, що досягає фотографій. Це призводить до необхідності знаходити спосіб переміщення світлочутливого регіону до верхньої частини чіпа, що дозволяє йому зібрати більше світла. Оптимізовані датчики з підсвічуванням можуть розширювати спектральний діапазон до рівня глибокого УФ із підтримкою високої та стабільної чутливості. Вони також покращують продуктивність системи, отримуючи більше світла, що покращує співвідношення сигнал / шум, збільшує швидкість перевірки та мінімізує пошкодження ультрафіолетового випромінювання делікатних напівпровідникових пристроїв.

Як зазначено вище, головним питанням з датчиками струму є те, що піксель набагато більше, ніж просто фотодіод, оскільки він також включає в себе



транзистори та проводки для підсилення заряду, перенесення його в частину обробки сигналу мікросхеми та перезавантаження між кадрами (Рис. X). Ці електроніки потрапляють на вершину кремнієвого шару, частково затемнюючи його від світла і в результаті чого виглядають добре для типового пікселя [6].

Це, природно, призводить до зменшення кількості світла через відхилення від кабелю та кута проникнення. Типові коефіцієнти заповнення датчиків - частина світла, яка успішно знімається, коливається від 30% до 80%. Навпаки, датчик заднього освітлення може мати коефіцієнт заповнення майже 100%. Світло підстрибуючи всередині електроніки також може викликати інші проблеми, такі як віньєтування та перехресні переговори. Таким чином, конструкція, яка поставляє фотодіоди на вершині, явно бажана. Наявність світлочутливої зони на бічній поверхні чіпа до світла також різко покращує кутовий відгук датчика [6].

## **2.3. Матричний фотоприймач**

### **2.3.1. Просторова дискретизація**

Просторова дискретизація - заміна зображення, тон якого довільно змінюється в координатах  $X$  і  $Y$ , зображенням, складеним з окремих ділянок - зон, в межах яких цей параметр усереднені.

У загальному випадку, як уже вказувалося, частота дискретизації повинна мінімум в два рази перевищувати частоту гармонійної складової вихідного зображення, що підлягає відтворення на копії. Це положення схематично пояснює рис. 2.5 (а).

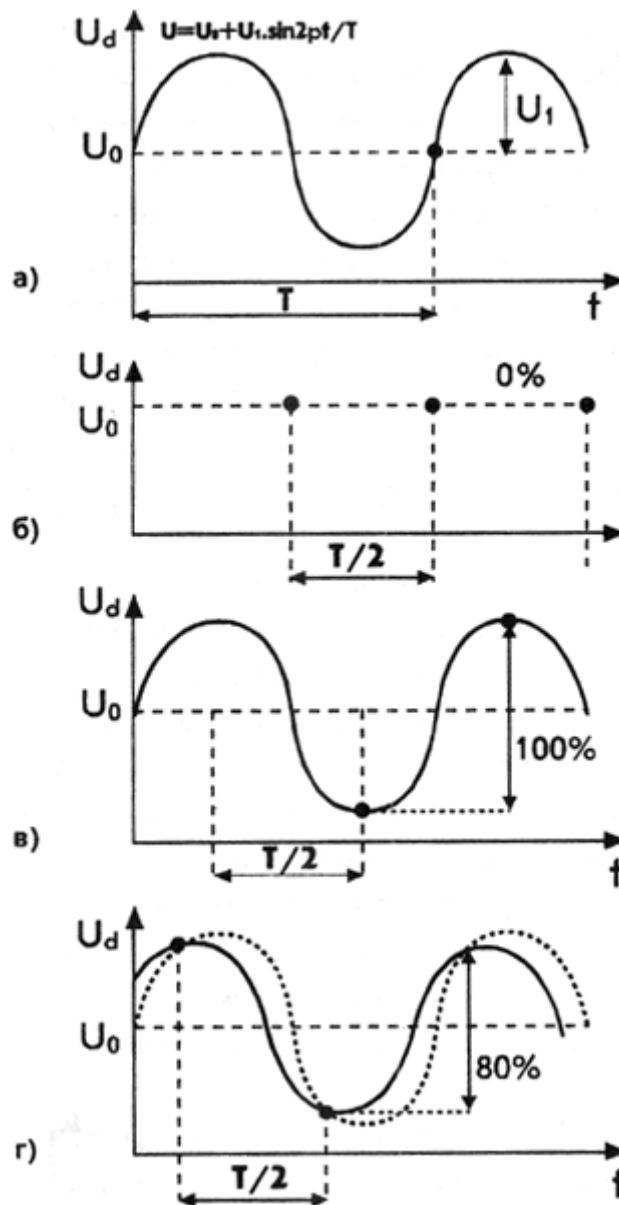


Рис.2.5 Вихідний сигнал (а), значення його вибірки і глибин; модуляції (%) при нульовій (б), протилежній (в) і проміжній (г) фазі частоти дискретизації

Вихідний сигнал (а), значення його вибірки і глибин; модуляції (%) при нульовій (б), протилежній (в) і проміжній (г) фазі частоти дискретизації, на позиції а) якого вихідне безперервне повідомлення є синусоїдальне коливання  $u(t)$  з періодом  $T$ . Спектр такого сигналу становлять постійна складова і перша гармоніка:

$$u = U_0 + U_1 \sin(2\pi t / T) \quad (2.11)$$

При нульовій фазі дискретних відліків періоду  $T / 2$  глибина їх модуляції першої гармонікою вихідного сигналу дорівнює нулю і інформація про частоту

цілком втрачається. Передається лише середнє значення Вихідного сигналу (див. Рис. 2.5, б). Зі зміною фази відліків на половину їх періоду глибина модуляції виявляється рівною 100% (див. Рис. 2.5, в). Проміжним між розглянутими фазами відліків супроводжують спотворення амплітуди і фази першої гармоніки, хоча, як показує графік на рис. 2.5 (г), інформація про її частоті зберігається.

Як мінімум одновірна (по одній з координат) дискретизація зображень супроводжує процесу електрооптичних аналізу. В аналогових репродукційного системах і в телебаченні оптичний параметр, який є функцією координат оригіналу або переданої сцени, перетворюється в амплітуду електричного сигналу, що змінюється на виході ФЕП в часі при порядковому зчитуванні (скануванні). Спектр просторових частот зображення в напрямку, поперечному напрямку рядкової розгортки, обмежується частотою розкладання на рядки, В силу кінцевих розмірів скануючого плями (апертуриапертура) цей спектр обмежений і вздовж рядків частотою, зворотній величині цієї плями. Другою причиною обмеження спектра частот і дискретизації зображення уздовж рядка є модуляція відеосигналом амплітуд, фаз або частот додаткового електромагнітного коливання - несучої частоти, необхідної для передачі сигналу, наприклад, в телебаченні або в аналоговому дистанційному (з використанням електричних каналів зв'язку) репродуковані.

Двовірна (по обох координатах) дискретизація і квантуванняквантуваніє (дискретизація за рівнем) мають місце при так званому аналого-цифровому перетворенні відеосигналу, в результаті якого сукупність просторових відліків значення тону може бути представлена деяким масивом чисел, записаних, наприклад, в двійковому коді. Таке уявлення дозволяє відволіктися від часу реального сканування і виробляти функціональні перетворення тони, кольори, дрібних деталей, контурів і іншого змісту зображення як операції над числами і цього масиву. Для подібних цілей нині ефективно використовуються ЕОМ.

Просторова дискретизація супроводжує і растрівання - поданням зображення у вигляді сукупності запечатаних і пробільних елементів, відносна площаотносительная площа, (%) яких визначається тоном або кольором

відповідних ділянок оригіналу. При цьому, як уже зазначалося, частота першої дискретизації, пов'язаної з електрооптичними властивостями аналізу і аналого-цифровим перетворенням, приймається, як правило, в два рази перевищує лінійну частоту поліграфічного растра, а точніше, частоту растрової функції растрової функції, всередині періоду якої формується ту чи іншу кількість растрових точок і пробілів.

Якщо ця умова дотримується, то при відтворенні системи періодичних штрихів довільної просторової фази розміри сусідніх точок будуть хоч скільки-небудь відрізнятися один від одного у всіх випадках крім одного: коли самі штрихи зрушені рівно на половину періоду щодо елемента розкладання 1 і растрової ячейки растрової осередок. На відбитку замість штрихів утворюється рівномірний поле однакових растрових точок з відносною площею 50% (див., г Рис. 2.6). Штрихи частоти  $0,5L$  в растровій решітці лінійності  $L$  при співпадаючих (а) і протилежних (в) фазах; їх растрові копії: б, г - при зчитувальному елементі 1 рівному кроці лінійності; д - при відліку 2 вдвічі менших кроку растра), оскільки коефіцієнт відображення оригіналу, усереднений по площі зчитувального плями 1, має однакове (проміжне) значення для всіх елементів растра. У зону відліку 1 кожен раз потрапляє по половині штриха і половині пробілу (див. Рис. 2.6, в). Цей випадок аналогічний представлено на рис. 2.5 (б).

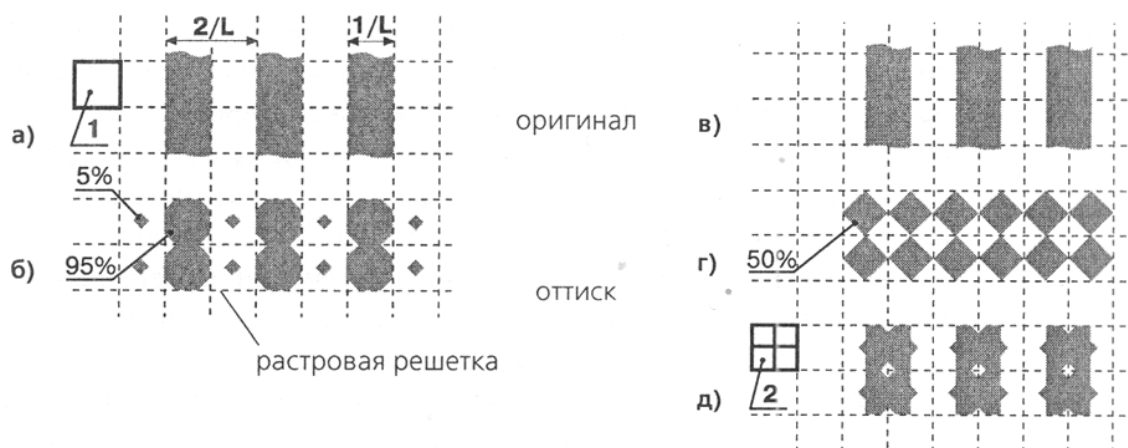


Рис.2.6. Штрихи частоти  $0,5L$  в растровій решітці лінійності  $L$  при співпадаючих (а) і протилежних (в) фазах; їх растрові копії: б, г - при

зчитувальному елементі 1 рівному кроці лініатури;  $d$  - при відліку 2 вдвічі менших кроку растра

У всіх інших просторових фазах контраст штрихів на репродукції буде вищою, оскільки відрізняються значення сусідніх відліків і розміри формованих відповідно до них растрових точок. Максимальна різниця має місце в протилежному крайньому випадку коли, як показано на рис. 2.6 (а, б), штрихи частоти  $0,5L$  збігаються по фазі з растрової ґратами. Тут має місце аналогія з випадком, иллюстрируемое рис. 2.5 (а, в). Вони передаються растром в два рази більшою лініатури, що дорівнює  $L$  лин / см, без втрати контрасту. Гарантію передачі штрихів з повним контрастом незалежно від їх просторової фази дає частота розкладання, в два рази перевищує растрову лініатуру, як пояснює рис. 2.6 (д).

Якщо зображення дискретизовано, його яскравість відома тільки в дискретній множині точок. Можна вважати, що зображення являє собою дискретну ґратку імпульсів

$$f(x, y) = wh \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} \delta(x - kw, y - lh) \quad (2.12)$$

де  $w$  та  $h$  – горизонтальний та вертикальний крок решітки відповідно. Тоді перетворення Фур'є приймає вид:

$$F(u, v) = wh \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} \delta(x - kw, y - lh) e^{-i(ux+vy)} dx dy = wh \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} e^{-i(ukw+vlh)} \quad (2.13)$$

Це - періодична функція. По  $u$  період дорівнює величині  $2\pi/w$  а по  $v$  величині  $2\pi/h$ . Таким чином, дискретна функція перетворюється в періодичну. Останнє означає, що ми можемо відкинути ту частину  $F(u, v)$ , для якої  $|u| > \pi/w$  або  $|v| > \pi/h$ . Для відновлення функції  $f(x, y)$  вона нам не потрібна.

Цікаво знайти зворотне перетворення функції, яка в зазначеній галузі збігається з  $F(u, v)$  а всюди поза нею дорівнює нулю:

$$\tilde{F}(u, v) = \begin{cases} F(u, v) & \text{при } |u| \leq \pi/w \text{ та } |v| \leq \pi/h \\ 0 & \text{при } |u| > \pi/w \text{ або } |v| > \pi/h \end{cases} \quad (2.14)$$

Обернене перетворення має вид

$$\tilde{f}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi/h}^{\pi/h} \int_{-\pi/w}^{\pi/w} F(u, v) e^{+i(ux+vy)} dx dy \quad (2.15)$$

Ця функція визначена для всіх  $x$  і  $y$ , але особливий для нас інтерес представляють її значення в точках решітки. Ми можемо перетворити її до виду

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x, y) &= \frac{wh}{4\pi^2} \int_{-\pi/h}^{\pi/h} \int_{-\pi/w}^{\pi/w} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} e^{-i(ukw+vlh)} e^{+i(ux+vy)} dudv = \\ &= \frac{wh}{4\pi^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} \int_{-\pi/h}^{\pi/h} \int_{-\pi/w}^{\pi/w} e^{i[u(x-kw)+v(y-lh)]} dudv = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} f_{kl} \frac{\sin[\pi(x/w-k)]}{\pi(x/w-k)} \frac{\sin[\pi(y/h-l)]}{\pi(y/h-l)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

При  $(x, y) = (kw, lh)$  отримуємо  $f_{kl}$ . Між точками решітки  $\tilde{f}(x, y)$  отримуємо інтерполяцію за допомогою ядра перетворення, рівного добутку двох членів виду  $\sin(x)/x$  та  $\sin(y)/y$ .

### 2.3.2. Шуми

Шуми є важливою проблемою на сьогоднішній день, оскільки вони визначають нижні межі, як щодо точності будь-яких вимірювань, так і щодо величини сигналів, які можуть бути оброблені засобами електроніки.

Відношення сигнал / шум показує, наскільки хороший може бути сигнал відеокамери, особливо в умовах низької освітленості. Шуму уникнути неможливо, але його можна мінімізувати. В основному, він залежить від якості ПЗС-матриці, електроніки і зовнішніх електромагнітних впливів, а також високою мірою і від температури електроніки.

Випадковий шум характеризується коливаннями яскравості і кольоровості вище і нижче дійсних значень. Певна частка випадкового шуму буде завжди присутньою, і її зображення буде змінюватися від кадру до кадру, навіть якщо параметри експозиції ідентичні.

Структурний шум включає те, що називається «гарячими пікселями», які можуть бути визначені як інтенсивність в пікселі, значно перевершує коливання, викликані випадковим шумом.

Лінійний шум залежить переважно від камери і є шумом, який вносить сама камера в процесі зчитування даних з цифрового сенсора.

Певний рівень шуму завжди присутній в будь-якому електронному приладі, який передає або приймає «сигнал». Відношення сигнал-шум є

корисним і універсальним способом порівняння відносної кількості сигналу і шуму для будь-якої електронної системи; високе відношення показує надзвичайно малий видимий шум, тоді як для низьке відношення буде протилежне.

Відношення сигнал / шум (ВСШ, англ. SNR, Signal-to-Noise Ratio) - безрозмірна величина, що дорівнює відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \left( \frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2 \quad (2.17)$$

де  $P$  - середня потужність, а  $A$  - середньоквадратичне значення амплітуди. Обидва сигнали вимірюються в смузі пропускання системи. Зазвичай відношення сигнал / шум виражається в децибелах:

$$\text{(дБ):} \quad SNR(dB) = 10 \lg \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 20 \lg \left( \frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right) \quad (2.18)$$

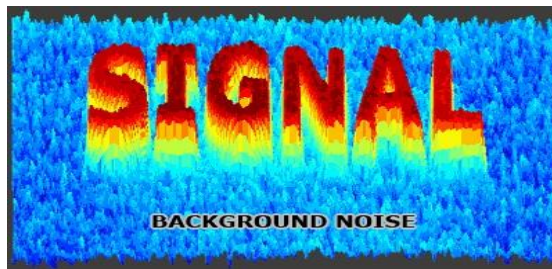


Рис 2.7 – Зображення з високим відношенням сигнал шум

У наведеному вище зображенні (рис. 2.7) співвідношення сигнал-шум досить велике, щоб чітко відокремити інформацію в зображенні від фонового шуму. Низьке ЗСШ могло б привести до появи зображення, де сигнал і шум можна порівняти, і тому їх складніше відрізнити один від одного (рис. 2.8).

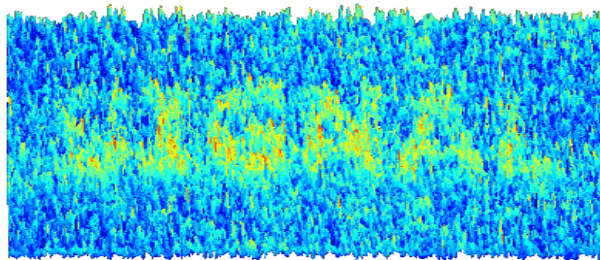


Рис. 2.8 – Зображення з низьким відношенням сигнал шум

Ознайомившись з існуючими програмними засобами для обробки зображень, ми вибрали дві, що найкращим чином показали себе програми -

ImageJ і Imatest. Основний акцент був зроблений на програмі ImageJ, так як вона володіє доступним і зрозумілим інтерфейсом, проста в освоєнні і є безкоштовним програмним забезпеченням. Проте, в подальшому планується робота з програмою Imatest, яка має ширші можливості з вимірювання параметрів і характеристик зображень.

ВСШ можна обчислити, використовуючи програмний пакет для обробки зображень ImageJ. Проводячи аналіз зображення, отримуємо дані про середнє значення яскравості і стандартному відхиленні. На основі цих даних проводиться розрахунок ВСШ за формулою

$$SNR = \frac{M}{\sigma} \quad (2.19)$$

де  $M$  – середнє значення яскравості;

$\sigma$  – стандартне відхилення.

Стандартне відхилення є мірою шуму (тобто наскільки вибрані пікселі можуть відрізнитися від вищезазначеної середньої величини яскравості).

В рамках роботи ми розділили завдання вимірювання ВСШ на три етапи. Як джерело для оцінки ВСШ було обрао тестове зображення, створене в програмі ImageJ, і фотографія з низьким рівнем шумів. Наведемо приклад вимірювання ВСШ для тестового зображення, яке створили в програмі ImageJ (рис. 2.9). Воно являє собою монохромне зображення, в якому відсутні шуми і ВСШ рівне практично нескінченному значенню. Це підтверджує гістограма для даного зображення, представлена на рис. 2.10.



Рис. 2.9 Тестове зображення



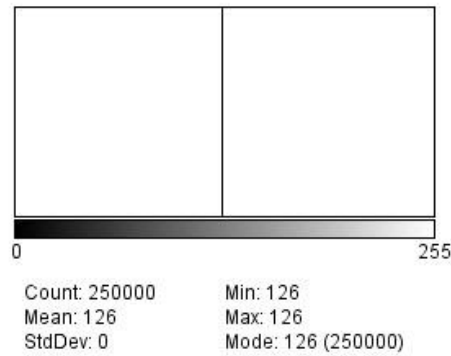


Рис. 2.10 Гістограма тестового зображення

Програмно додаємо до тестового зображення шуми з відомим СКВ, рівним 20 (рис. 2.11)

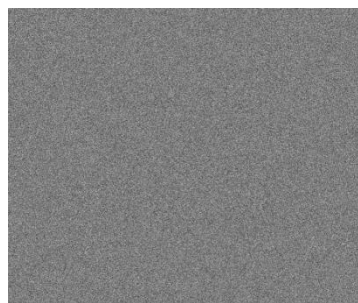


Рис. 2.11 Тестове зображення з шумами

Будуємо гістограму зображення з шумами (рис. XX)

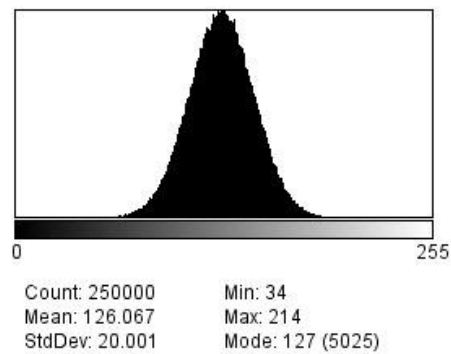


Рис. 2.12 Гістограма тестового зображення з шумами

З гістограми видно, що СКВ відповідає значенню, яке було задано нами спочатку. Обчислимо відношення сигнал / шум для даного зображення.

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{126}{20} \right) = 16 \text{ дБ} \quad (2.20)$$

## **2.4. Цифрова обробка зображень**

### **2.4.1. RAW формат**

RAW - формат цифрових файлів зображення, що містить необроблені дані про електричні сигнали з фотоматриці цифрового фотоапарата, цифрової кінокамери, а також сканерів нерухомих зображень або кіноплівки. Назва англ. Raw, тобто. «Сірий» такі файли отримали тому, що не оброблені.

У таких файлах міститься інформація, отримана безпосередньо з АЦП про електричні сигнали матриці, яка не має будь-якої загальноприйнятої специфікації (стандарту). Через технічні особливостей матриць і АЦП різних виробників загального стандарту RAW не існує, і файли з різних пристроїв відрізняються один від одного. Тому їх читання і конвертація вимагають спеціальних додатків, часто непридатних для роботи з файлами RAW інших виробників, і навіть моделей камер тих же брендів. З цієї ж причини розширення файлу RAW може бути різним у різних типів фото- і відеоапаратури.

Файли типу RAW іноді називають «цифровим негативом», оскільки вони відіграють роль, схожу на роль негативу в аналогових фотографії та кінематографії [15]. Як фотографічний, так і кінонегатів не є кінцевим зображенням, але містять всю необхідну інформацію для його створення. Схожий сенс несе і процес конвертації файлів RAW, званий в більшості додатків «проявом» (англ. Development), оскільки за аналогією з обробкою фотоматеріалів, дозволяє так чи інакше інтерпретувати закладену в прихованому зображенні інформацію.

При конвертації сам файл RAW не змінюється, а служить вихідним матеріалом для створення іншого файлу, придатного для візуалізації та друку. Однак, процес призводить до незворотної втрати інформації, яка не може бути відновлена з отриманих таким чином файлів. Крім того, файли RAW при конвертації піддаються дебайеризації для перекладу монохромного масиву даних в той чи інший колірний простір [2]. Кінцевий графічний файл, придатний для перегляду в графічних редакторах, це «відбиток» з «цифрового негативу», умови створення якого при конвертації можна змінювати, як в процесі аналогового

фотодруку. Конвертація файлів RAW може відбуватися як вбудованим в камеру штатним конвертером, генеруючим «на льоту» знімки форматів TIFF або JPEG, так і після зйомки на зовнішньому комп'ютері. У випадку із смартфонами відбувається миттєва конвертація RAW файлу, за попередньо розробленим алгоритмом, що відповідає характеристикам камери. [17].

Внутрішньо-камерне налаштування балансу білого, світлочутливості і стилю зображення є ні чим іншим, як регулюваннями вбудованого конвертера. Тому при зовнішній конвертації на комп'ютері більшість цих налаштувань може бути змінено в будь-яку сторону без втрати якості зображення [18]. При цьому замість вибору стилю зображення можуть бути безпосередньо налаштовані яскравість, контраст, колірна насиченість і контурна різкість. Обрані під час зйомки установки балансу білого служать при перетворенні лише в якості настройки за замовчуванням, оскільки файли RAW самі по собі не інтерпретують колір знятих об'єктів. Обрану перед зйомкою колірну температуру при конвертації файлу можна поміняти в будь-яку сторону без будь-яких обмежень. Все це дозволяє отримувати зображення дуже високої якості навіть в разі значних помилок в момент зйомки [15].

Так само, як і негатив фотографії або кінофільму, файли RAW мають більші фотографічною широтою і глибиною кольору, ніж кінцеві знімки. Це пояснюється тим, що в цих файлах часто використовуються 12- або 14-бітові кольорові простори, здатні зберігати значно більше даних, ніж загальноприйняті 8-бітові зображення формату JPEG. Так, за даними журналу «Digital Photography Review», файли RAW камери Nikon D3 мають широти до 12 експозиційних ступенів, тоді як при зйомці в стандарті JPEG цей же параметр не перевищує 8,6 «стопа» [15].

Всі перераховані особливості означають повну перевагу RAW в порівнянні зі стандартними форматами при необхідності отримання фотографій та кінематографічного зображення високої якості. З цієї причини «сирий» формат в обов'язковому порядку використовується в комерційній фотографії, а також в професійному цифровому кінематографі. Однак, в фотожурналістики

використання RAW обмежена, перш за все через вимоги оперативності, що виключають додатковий час на конвертацію поза камерою. Крім того, вихідні файли RAW значно важче передати по мережі інтернет, ніж внутрішньо-камерного JPEG. Агентство Reuters у 2015 році навіть ввів заборону на прийом фотографій від позаштатних репортерів, якщо вони конвертовані в JPEG зовнішнім конвертером. Це пояснюється також міркуваннями достовірності зображень, які при конвертації можуть бути модифіковані [15] [17].

#### 2.4.2. Алгоритми JPEG стиснення

Першими для архівації зображень стали застосовуватися звичні алгоритми. Ті, що використовувалися і використовуються в системах резервного копіювання, при створенні дистрибутивів і т.п. Ці алгоритми архівували інформацію без змін. Однак основною тенденцією останнім часом стало використання нових класів зображень. Старі алгоритми перестали задовольняти вимогам, що пред'являються до архівації. Багато зображення практично не стискалися, хоча "на погляд" володіли явною надмірністю. Це призвело до створення нового типу алгоритмів - стискають з втратою інформації. Як правило, коефіцієнт архівації та, отже, ступінь втрат якості в них можна задавати. При цьому досягається компроміс між розміром і якістю зображень.

Одна з серйозних проблем машинної графіки полягає в тому, що до цих пір не знайдений адекватний критерій оцінки втрат якості зображення. А втрачається воно постійно - при оцифрування, при перекладі в обмежену палітру кольорів, при перекладі в іншу систему кольоропередачі для друку, і, що для нас особливо важливо, при архівації з втратами. Можна навести приклад простого критерію: середньоквадратичне відхилення значень пікселів (L2 міра, або root mean square - RMS):

$$d(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} (x_{i,j} - y_{i,j})^2}{n^2}} \quad (2.21)$$

По ньому зображення буде сильно зіпсовано при зниженні яскравості всього на 5% (око цього не помітить - залежно від виробу настройка яскравості варіюється набагато сильніше). У той же час зображення зі "снігом" - різкою

зміною кольору окремих точок, слабкими смугами або "муаром" будуть визнані "майже не змінилися" Свої неприємні сторони є і у інших критеріїв.

Розглянемо, наприклад, максимальне відхилення:

$$d(x, y) = \max_{ij} |x_{ij} - y_{ij}| \quad (2.22)$$

Ця міра, як можна здогадатися, вкрай чутлива до биття окремих пікселів. Тобто у всьому зображенні може істотно змінитися тільки значення одного пікселя (що практично непомітно для ока), проте згідно цій мірі зображення буде сильно зіпсовано.

Міра, яку зараз використовують на практиці, називається мірою відношення сигналу до шуму (peak-to-peak signal-to-noise ratio - PSNR).

$$d(x, y) = 10 \log_{10} \frac{255^2 n^2}{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} (x_{ij} - y_{ij})^2} \quad (2.23)$$

Дана міра, по суті, аналогічна середньоквадратичного відхилення, проте користуватися нею кілька зручніше за рахунок логарифмічного масштабу шкали. Їй притаманні ті ж недоліки, що і середньоквадратичного відхилення [7].

Найкраще втрати якості зображень оцінюють наші очі. Відмінною вважається архівація, при якій неможливо на око розрізнити початкове і стиснуте зображення. Доброю - коли сказати, яке з зображень піддавалося архівації, можна тільки порівнюючи дві картинки що знаходяться поруч. При подальшому збільшенні ступеня стиснення, як правило, стають помітні побічні ефекти, характерні для даного алгоритму. На практиці, навіть при відмінному збереженні якості, в зображення можуть бути внесені регулярні специфічні зміни. Тому алгоритми архівації з втратами не рекомендується використовувати при стисненні зображень, які в подальшому збираються або друкувати з високою якістю, або обробляти програмами розпізнавання образів. Неприємні ефекти з такими зображеннями, як ми вже говорили, можуть виникнути навіть при простому масштабуванні зображення [7].

JPEG - один з найновіших і досить потужних алгоритмів. Практично він є стандартом де-факто для повнокольорових зображень [X]. Оперує алгоритм

областями  $8 \times 8$ , на яких яскравість і колір змінюються порівняно плавно. Внаслідок цього, при розкладанні матриці такої області в подвійний ряд по косинусам (див. Формули нижче) значущими виявляються тільки перші коефіцієнти. Таким чином, стиснення в JPEG здійснюється за рахунок плавності зміни кольорів у зображенні [7].

Алгоритм розроблений групою експертів в області фотографії спеціально для стиснення 24-бітових зображень. JPEG - Joint Photographic Expert Group - підрозділ в рамках ISO - Міжнародної організації зі стандартизації. Назва алгоритму читається [ 'jei'peg]. В цілому алгоритм заснований на дискретному косинусоїдальному перетворенні (надалі ДКП), що застосовується до матриці зображення для отримання деякої нової матриці коефіцієнтів. Для отримання вихідного зображення застосовується зворотне перетворення [7].

ДКП розкладає зображення по амплітудам деяких частот. Таким чином, при перетворенні ми отримуємо матрицю, в якій багато коефіцієнтів або близькі, або дорівнюють нулю. Крім того, завдяки недосконалості людського зору, можна апроксимувати коефіцієнти більш грубо без помітної втрати якості зображення [7].

Для цього використовується квантування коефіцієнтів (англ. quantization). У найпростішому випадку - це арифметичне побітове зрушення вправо. При цьому перетворенні втрачається частина інформації, але можуть досягатися великі коефіцієнти стиснення [7].

### **Як працює алгоритм**

Розглянемо алгоритм. Нехай ми стискаємо 24-бітове зображення.

Крок 1.

Переводимо зображення з колірного простору RGB, з компонентами, що відповідають за червону (Red), зелену (Green) і синю (Blue) складові кольору точки, в колірний простір YCrCb (іноді називають YUV) [7].

У ньому Y – складова яскравості, а Cr, Cb - компоненти, що відповідають за колір (хроматичний червоний і хроматичний синій). За рахунок того, що людське око менш чутливе до кольору, ніж до яскравості, з'являється можливість

архівувати масиви для Cr і Cb компонент з великими втратами і, відповідно, великими коефіцієнтами стиснення. Подібне перетворення вже давно використовується в телебаченні. На сигнали, що відповідають за колір, там виділяється більш вузька смуга частот [7].

Спрощено переклад з колірного простору RGB в колірний простір YCrCb можна уявити за допомогою матриці переходу:

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.0813 \\ 0.1687 & -0.3313 & 0.5 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Зворотне перетворення здійснюється множенням вектора YUV на зворотну матрицю.

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} * \left( \begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \right) \quad (2.25)$$

Крок 2.

Розбиваємо вихідне зображення на матриці 8x8. Формуємо з кожної три робочі матриці ДКП - по 8 біт окремо для кожної компоненти. При великих коефіцієнтах стиснення цей крок може виконуватися трохи складніше. Зображення ділиться по компоненті Y - як і в першому випадку, а для компонент Cr і Cb матриці набираються через рядок і через стовпець. Тобто з вихідної матриці розміром 16x16 виходить тільки одна робоча матриця ДКП. При цьому, як неважко помітити, ми втрачаємо 3/4 корисної інформації про колірних складових зображення і отримуємо відразу стиснення в два рази. Ми можемо чинити так завдяки роботі в просторі YCrCb. На результуючому RGB зображенні, як показала практика, це позначається не сильно [7].

Крок 3.

Застосовуємо ДКП до кожної робочої матриці. При цьому ми отримуємо матрицю, в якій коефіцієнти в лівому верхньому кутку відповідають низькочастотній складовій зображення, а в правому нижньому - високочастотній.

У спрощеному вигляді це перетворення можна представити так [7]:

$$Y[u, v] = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} C(i, u) \times C(j, v) \times y[i, j], \quad (2.26)$$

$$\text{де } C(i, u) = A(u) \times \cos\left(\frac{(2 \times i + 1) \times u \times \pi}{2n}\right)$$

$$A(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{for } u \equiv 0 \\ 1, & \text{for } u \neq 0 \end{cases}$$

Крок 4.

Виробляємо квантування. В принципі, це просто розподіл робочої матриці на матрицю квантування поелементно. Для кожної компоненти (Y, U і V), в загальному випадку, задається своя матриця квантування  $q[u, v]$  (далі МК) [7].

$$Yq[u, v] = \text{IntegerRound}\left(\frac{Y[u, v]}{q[u, v]}\right) \quad (2.27)$$

На цьому кроці здійснюється управління ступенем стиснення, і відбуваються найбільші втрати. Зрозуміло, що, задаючи МК з великими коефіцієнтами, ми отримаємо більше нулів і, отже, більшу ступінь стиснення [7].

У стандарт JPEG включені рекомендовані МК, побудовані дослідним шляхом. Матриці для більшого або меншого коефіцієнтів стиснення отримують шляхом множення вихідної матриці на деяке число  $\gamma$  [7].

З квантуванням пов'язані і специфічні ефекти алгоритму. При великих значеннях коефіцієнта  $\gamma$  втрати в низьких частотах можуть бути настільки великі, що зображення розпадеться на квадрати 8x8. Втрати в високих частотах можуть проявитися в так званий "ефект Гіббса", коли навколо контурів з різким переходом кольору утворюється своєрідний "німб" [7].

Крок 5.

Переводимо матрицю 8x8 в 64-елементний вектор за допомогою "зигзаг" - сканування, тобто беремо елементи з індексами (0,0), (0,1), (1,0), (2,0) ...



$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$	$a_{0,4}$	$a_{0,5}$	$a_{0,6}$	$a_{0,7}$
$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$
$a_{2,0}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{3,0}$			
$a_{3,0}$	$a_{3,0}$	$a_{3,0}$	$a_{3,0}$				
$a_{4,0}$	$a_{4,1}$	$a_{4,2}$					
$a_{5,0}$	$a_{5,1}$						
$a_{6,0}$	$a_{6,1}$						
$a_{7,0}$	$a_{7,1}$						

Таким чином, на початку вектора ми отримуємо коефіцієнти матриці, відповідні низьких частотам, а в кінці – високим [7].

Крок 6.

Згортаємо вектор за допомогою алгоритму групового кодування. При цьому отримуємо пари типу (пропустити, число), де "пропустити" є лічильником пропускаються нулів, а "число" - значення, яке необхідно поставити в наступну комірку. Так, вектор 42 3 0 0 0 -2 0 0 0 0 1 ... буде згорнуто в пари (0,42) (0,3) (3, -2) (4,1) ....[7].

Крок 7.

Згортаємо отримані пари кодуванням по Хаффману з фіксованою таблицею [7].

Процес відновлення зображення в цьому алгоритмі повністю симетричний. Метод дозволяє стискати деякі зображення в 10-15 разів без серйозних втрат [7].

Істотними позитивними сторонами алгоритму є те, що:

- Здається ступінь стиснення.
- Вихідна кольорове зображення може мати 24 біта на точку.

Негативними сторонами алгоритму є те, що:

- При підвищенні ступеня стиснення зображення розпадається на окремі квадрати (8x8). Це пов'язано з тим, що відбуваються великі втрати в низьких частотах при квантуванні, і відновити вихідні дані стає неможливо.
- Виявляється ефект Гіббса - ореоли по межах різких переходів кольорів.

Як вже говорилося, стандартизований JPEG відносно недавно - в 1991 році. Але вже тоді існували алгоритми, що стискають сильніше при менших втратах якості. Справа в тому, що дії розробників стандарту були обмежені потужністю техніки, що існувала на той момент. Тобто навіть на персональному комп'ютері алгоритм повинен був працювати менше хвилини на середньому зображенні, а його апаратна реалізація повинна бути відносно простою і дешевою. Алгоритм повинен був бути симетричним (час розархівзації приблизно дорівнює часу архівзації) [7].

Остання вимога уможливило появу таких іграшок, як цифрові фотоапарати - пристрої, розміром з невелику відеокамеру, що знімають 24-бітові фотографії на 10-20 Мб флеш карту з інтерфейсом PCMCIA. Потім ця карта вставляється в роз'єм на вашому ноутбуці і відповідна програма дозволяє зчитати зображення. Чи не правда, якщо б алгоритм був несиметричний, було б неприємно довго чекати, поки апарат "перезарядиться" - стисне зображення [7].

Не дуже приємною властивістю JPEG є також те, що нерідко горизонтальні і вертикальні смуги на дисплеї абсолютно не видно і можуть проявитися лише при друку в вигляді муарового візерунка. Він виникає при накладенні похилого растру друку на горизонтальні і вертикальні смуги зображення. Через ці сюрпризи JPEG не рекомендується активно використовувати в поліграфії, задаючи високі коефіцієнти. Однак при архівзації зображень, призначених для перегляду людиною, він на даний момент незамінний [7].

Широке застосування JPEG довгий час стримувалося, мабуть, лише тим, що він оперує 24-бітними зображеннями. Тому для того, щоб з прийнятною якістю подивитися картинку на звичайному моніторі в 256-кольоровий палітрі, потрібно застосування відповідних алгоритмів і, отже, певний час. У додатках, орієнтованих на прискіпливого користувача, таких, наприклад, як ігри, подібні затримки неприйнятні. Крім того, якщо наявні у вас зображення, припустимо, в 8-бітному форматі GIF перевести в 24-бітний JPEG, а потім назад в GIF для перегляду, то втрата якості відбудеться двічі при обох перетвореннях. Проте, виграш в розмірах архівів часто настільки великий (в 3-20 разів!), А втрати якості

настільки малі, що зберігання зображень в JPEG виявляється дуже ефективним [7].

Кілька слів необхідно сказати про модифікаціях цього алгоритму. Хоча JPEG і є стандартом ISO, формат його файлів не був зафіксований. Користуючись цим, виробники створюють свої, несумісні між собою формати, і, отже, можуть змінити алгоритм. Так, внутрішні таблиці алгоритму, рекомендовані ISO, замінюються ними на свої власні. Крім того, легка плутанина присутній при завданні ступеня втрат. Наприклад, при тестуванні з'ясовується, що "відмінну" якість, "100%" і "10 балів" дають істотно відмінні картини. При цьому, до речі, "100%" якості не означають стиснення без втрат. Зустрічаються також варіанти JPEG для специфічних додатків [7].

Як стандарт ISO JPEG починає все ширше використовуватися при обміні зображеннями в комп'ютерних мережах. Підтримується алгоритм JPEG в форматах Quick Time, PostScript Level 2, Tiff 6.0 і, на даний момент, займає чільне місце в системах мультимедіа [7].

Характеристики алгоритму JPEG:

Коефіцієнти компресії: 2-200 (Здається користувачем).

Клас зображень: Повноколірні 24 бітові зображення або зображення в градаціях сірого без різких переходів квітів (фотографії) [7].

## Розділ 3. Вимірювання показників якості зображення цифрових камер

### 3.1. Метод похилого краю ( *slanted edge* )

Міжнародний стандарт 12233 встановлює метод вимірювання роздільної здатності камер і визначає порядок тестування та вигляд об'єктів для здійснення вимірювань. Метод похилої півплощини полягає в формуванні зображення границі перепаду інтенсивності, напрямком якої складає невеликий кут з напрямком стовпців матричного приймача випромінювання. Таким чином вертикально орієнтований край (вздовж стовпців приймача) дозволяє отримати горизонтальну ФРЛ на приймачі. В такому випадку відгук кожного рядка надасть різні ФРК через різні значення фази [11].

Із отриманого з приймача зображення похилого краю спеціальне програмне забезпечення виділяє прямокутну область, в межах якої розраховується ФРК. Оскільки край простягається на декілька рядків приймача, нахил можна визначити із зображення [27].

Дані кожного рядка пікселів проєктуються вздовж напрямку краю. Шляхом розрахунку похідної з отриманої ФРК знаходиться ФРЛ [7].

Головною перевагою методу похилої півплощини у порівнянні з іншими методами є те, що вистачає одного зображення для його реалізації. Як результат зміщення стають не потрібними, а результат отримується швидше. Використання синусоїдальної міри потребує формування щонайменше одного зображення на кожному просторову частоту. А при використанні метода Фуко кількість зображень залежить від бажаної дискретизації. Крім того, після кожного зміщення втрачається час на необхідне фокусування [27].

Ключовим моментом при використанні метода похилої півплощини є відсутність вимоги великої кількості пікселів. Їх кількість лише повинна бути достатньою для коректного розрахунку ФРК. Так, чим менше кут нахилу краю, тим більше має бути область для обробки. При використанні синусоїдальної міри зображення щонайменше одного періоду синусоїди має вміщуватися в розмір пікселя для розрахунку контрасту. Для низьких просторових частот вимоги до

кількості пікселів підвищуються. Крім того, стендове обладнання для вимірювання МПФ камер методом похилої площини майже не відрізняється від обладнання для вимірювання МПФ прямим методом [11].

Метод похилої півплощини заснований на аналізі знімка похилої кромки. Ця методика описана стандартом **ISO 12233** і застосовується, згідно з цим стандартом, у ряді програм для аналізу якості оптичних систем (наприклад, у додатку *Quick MTF*). Цей підхід, на відміну від інших, вимагає мінімальних приготувань, і ґрунтується на аналізі зображень, або частіше їх фрагментів, подібних рис. 3.1 [28].

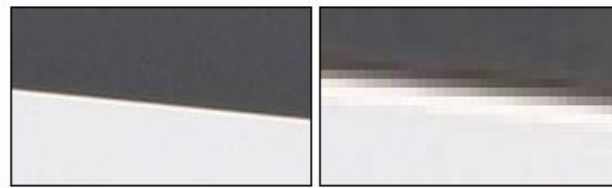


Рис.3.1 Фрагменти зображення похилої кромки для аналізу методом похилої півплощини

Принциповими кроками при проведенні розрахунку є:

1. Вибір ділянки кромки для аналізу;
2. Отримання пограничної кривої (ФРК);
3. Отримання ФРЛ, як похідної від ФРК;
4. Дискретним перетворенням Фур'є отримуємо ОПФ із ФРЛ, модуль ОПФ – шукана МПФ.

Міжнародний стандарт ISO12233, в якому визначено порядок і умови проведення вимірів МПФ методом похилого краю, крім цього визначає алгоритм і використовувані прийоми математичної обробки отриманих даних [28].

Етапи розрахунку по ISO12233

Послідовність дій:

- Виділення «зони інтересу» (*region of interest, ROI*);

Визначення певної ділянки ( $m$  ліній на  $n$  пікселів) отриманого зображення краю, для подальшого аналізу і обробки даних в цій зоні

- Отримання масиву даних за рахунок використання функції оптоелектронного перетворення(optoelectronic conversion function, OECF);
- Розрахунок інтенсивності кожного пікселя приймача, якщо зображення кольорове:

Здійснюється шляхом введення вагових коефіцієнтів до кольорових компонент:

$$Y = K_r \cdot R + K_g \cdot G + K_b \cdot B, \quad (3.1)$$

де  $Y$  – значення інтенсивності пікселя;  $R$ ,  $G$ ,  $B$  – величини значень відповідно червоної, зеленої та синьої кольорових компонент, а  $K_r$ ,  $K_g$ ,  $K_b$  – відповідні цим компонентам вагові коефіцієнти.

Найрозповсюдженіші набори коефіцієнтів:

**BT.709:**  $K_r = 0.2126$ ;  $K_g = 0.7152$ ;  $K_b = 0.0722$ ;

**BT.601:**  $K_r = 0.299$ ;  $K_g = 0.587$ ;  $K_b = 0.114$ .

- *Визначення положення і орієнтації кромки*

Розташування і напрям кромки оцінюються після лінійної інтерполяції, яку застосовують до масиву інтенсивностей. Її виконують після взяття одновірної дискретної похідної і обчислення центроїду кожної строки даних.

- *Отримання ФРК*

Дані кожного пікселя проектується вздовж напрямку кромки, щоб сформувати одновірну передискретизовану функцію розсіювання краю, або пограничну криву.

- *Зміна дискретизації сигналу*

Для зменшення впливу високочастотних спектрів вимірювання просторової роздільної здатності, так званий «аліасінг», виконують чотирьохкратне збільшення дискретизації даних масиву[28].

- *Розрахунок дискретного перетворення Фур'є масиву і застосування до нього віконної функції Хемінга. Отримано ОПФ.*
- *Визначення МПФ, як нормованого модуля розрахованої ОПФ.*

Виходячи з вищесказаного, стає зрозуміло, що основний компонент, який забезпечує високу якість та швидкість вимірювання розроблюваної системи для контролю якості цифрових камер – якісне, продумане програмне забезпечення.

### **3.2. Вимірювання шумів**

Цифровий шум на фотографії - дефект зображення, який полягає у виникненні хаотично розкиданих пікселів випадкового кольору і яскравості по всьому зображенню, що не відповідають зареєстрованому світлу. Основні причини виникнення шуму:

- чутливість ISO;
- витримка;
- щільність розміщення пікселів (розмір осередків матриці) Оптимальний розмір лежить в межах від 6 до 11 мкм. У камерах смартфонів розмір пікселів становить 0.8-1,2 мкм, що й обумовлює високий рівень шумів;
- а також технічні параметри матриці (дефекти кристалічної решітки кремнію, домішки, які не працюючі пікселі і т.д.).

У кольорових фотографіях шум має різну інтенсивність у кожному колірному каналі, що і надає йому певний колір. Колірний шум зображення може бути посилений в процесі обробки, шляхом зміни колірного балансу, настройки балансу білого. Наприклад, шум на фотографії, знятої при світлі лампи розжарювання, має переважно жовто-сині відтінки, але при корекції синього каналу зображення, для компенсації жовтизни фотографії, синій шум збільшиться.

Шум проявляється на однотонних ділянках, в градаціях, і особливо помітний на темних ділянках зображення при висвітленні.

Залежно від природи виникнення цифрового шуму в колірних каналах, розрізняють:

- яскравісний цифровий шум (англ. luminance noise);
- хроматичний цифровий шум (англ. chrominance noise);
- шум, який виникає при тривалих витримках (англ. stuck pixels).

Залежно від структури виникнення цифрового шуму розрізняють:

- постійний;
- випадковий шум.

Постійний шум виникає на одному і тому ж місці від фотографії до фотографії в зв'язку з перегріванням сенсора під час тривалих експозицій («гарячі» пікселі), а також з «битими» пікселями. Залежить від сенсора фотоапарата.

Для визначення розміщення «гарячих» пікселів постійного цифрового шуму на фотографії, можна провести такий дослід: при максимальному значенні ISO, 30-секундній витримці і з закритим об'єктивом натиснути на спуск. У підсумку виходить «зоряна матриця» фотоапарата.

На фотографії нижче (рис. 3.2), показаний шум матриці при ISO 3200, 30 с витримки.



Рис. 3.2 Постійний цифровий шум

Коли мова йде про оцінку шумів, варто скористатися двома методами, описаним вище, для визначення постійного шуму, а також програмний аналіз зображень отриманих при різних налаштуваннях витримки. В даній роботі для оцінки рівня шумів на фотографіях використовувався програмний пакет Photoshop. Для цього робимо знімки з ручними налаштуваннями ISO (50 та 1250)



та в палітрі гістограма порівнюємо значення STD Dev. Значення Std Dev показує, наскільки широко змінюються значення яскравості зображення (або його фрагментів). Для монотонної заливки Std Dev = 0, а для ділянки з рівними частками чорного і білого Std Dev = 127,5. Чим менше значення Std Dev, тим менше шум на фотографії (рис. 3.3).

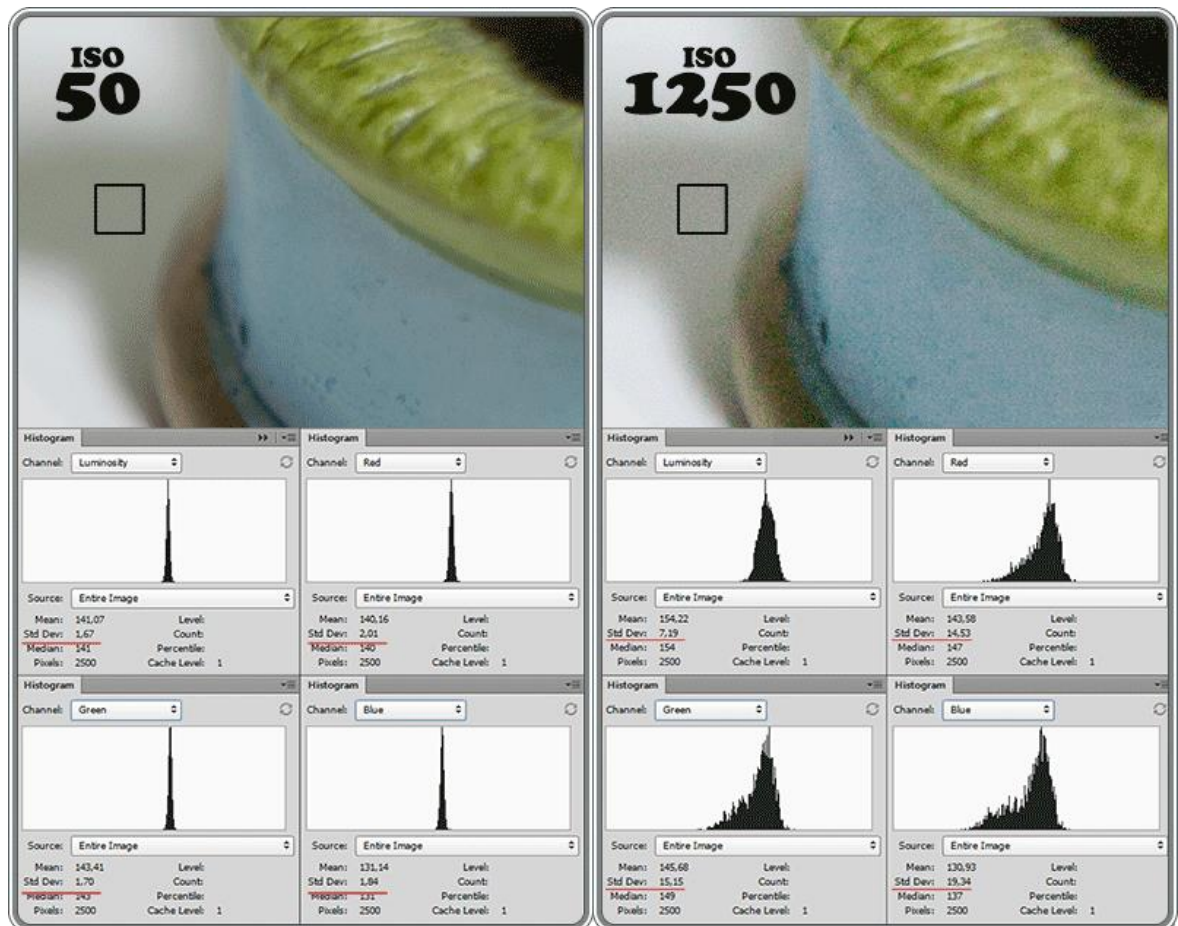


Рис.3.3 Оцінка рівня шумів на фотографії

Для визначення значення Std Dev інструментом Rectangular Marquee необхідно виділити ділянку з рівномірною яскравістю. У палітрі Histogram вибираємо канал Luminosity (для оцінки яскравості цифрових шумів) або по каналах RGB (для оцінки хроматичних цифрових шумів) і перевіряємо значення Std Dev на виділеній ділянці. Рівномірність яскравості можна відстежити Піпеткою (Eyedropper), відстежуючи інформацію в палітрі Info.

Якщо Std Dev менше 3 - рівень шумів прийнятний, більше 3 - потрібно застосовувати заходи щодо їх зниження. На сьогоднішній день, наявне програмне забезпечення для смартфонів на базі ос ios та Android, що може бути використаним в даних цілях. Проте звіти про реальні тести на дієздатність цього

програмного забезпечення відсутні, а в даній роботі дослідження не проводилось. В тінях шуми менш помітні, тому значення Std Dev не більше 5 також прийнятно.

В результаті виявляється канал, в якому значення Std Dev помітно вище, ніж в інших. В такому випадку, іноді досить відредагувати цей канал, щоб знизити цифровий шум на фотографії.

## Розділ 4. Експериментальна частина

Згідно із технічним завданням, необхідно знайти спосіб для простого тестування камер мобільних телефонів, який даватиме швидкі й об'єктивні результати. Після проведеного аналізу стану проблеми, було обрано для подальшого дослідження метод похилого краю (slanted edge method ISO12233), як метод, за допомогою якого можна отримати МПФ камери зробивши лише один знімок.

Усі модулі цифрових камер для мобільних пристроїв поставляються заводом виробником у зборі, матриця та об'єктв. У зв'язку із цим жодна із компаній, що займаються тестуванням камер, не проводить окремого тестування кожного із компонентів. В нашому випадку на отриманий результат окрім об'єктиву та матриці впливатиме ще цифрова обробка зображень (цифрова фільтрація), та стиснення RAW файлу до JPEG згідно із алгоритмами описаними вище. Результати роботи RAW конвертора, особливо ті, які впливають на різкість, зменшення шуму, кольорову гамму, значною мірою впливають на результати.

На сьогоднішній день у мережі є достатня кількість програм та скриптів, що дозволяють отримати МПФ камери за зображенням напівпохилої площини. Для роботи над дослідженням було обрано програму Imatest SFRplus, через наявність її безкоштовної версії, а також детальної літератури. Відповідно для дослідження використовувались тестові схеми рекомендовані компанією Imatest, рис 4.1

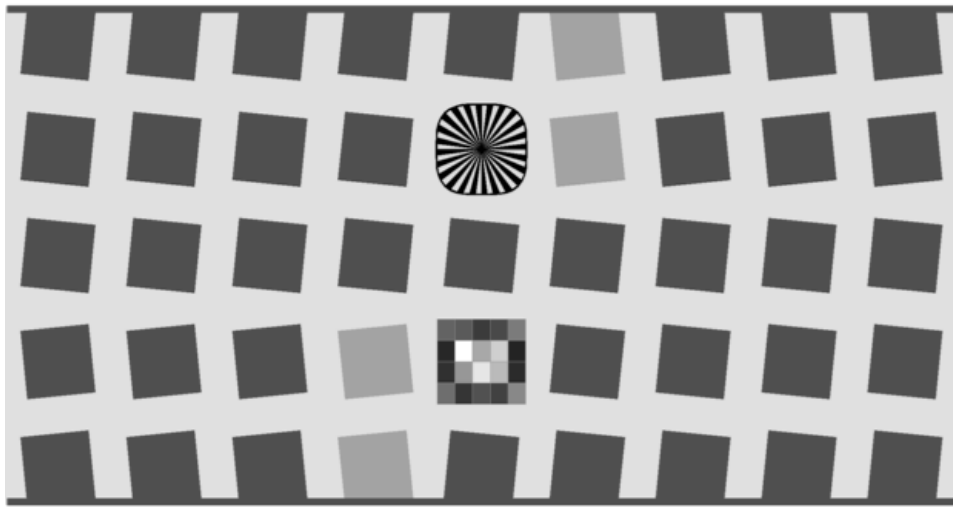


Рис.4.1 Стандартна тестова схема SFRplus

Стандартна тестова схема SFRplus складається з сітки  $5 \times 9$  квадратів, які мають співвідношення контрастності 10: 1. Коефіцієнт контрастності чотирьох із них (один стовпець від центру) становить 2: 1. Нижній центральний квадрат містить невеликий патч-шаблон з  $4 \times 5$  (щільність в кроках 0,1 від 0,05 до 1,95), а над центром розташована зірка фокуса. Дану тестову схему можна придбати, або роздрукувати на широкоформатному струменевому принтері із високим значенням dpi, розміром 0,8x1 метр.

Важливим фактором у проведенні дослідження являється освітлення. В більшості випадків достатньо двох джерел, встановлених під кутом від 30 до 45 градусів(рис. 4.2), проте рекомендується наявність 4 чи 6 джерел світла. Обов'язково уникати засвічення позаду камери, це спричиняє бліки. Для дослідження використовуємо світлодіодні лампи із кольоровою температурою 4700K.

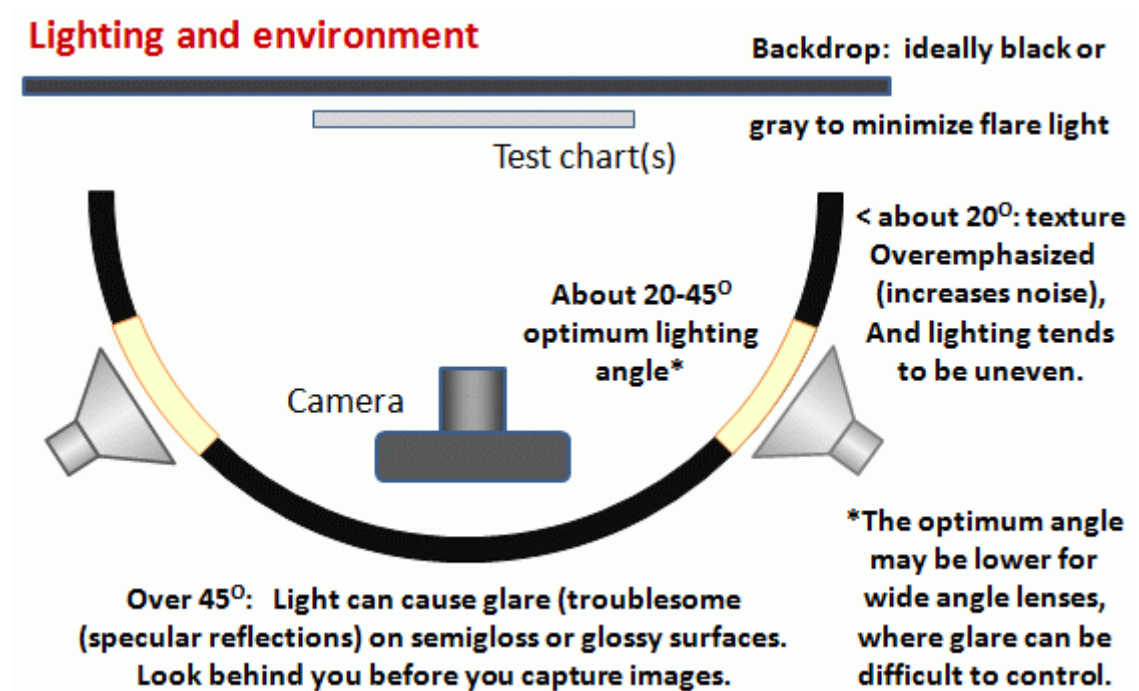
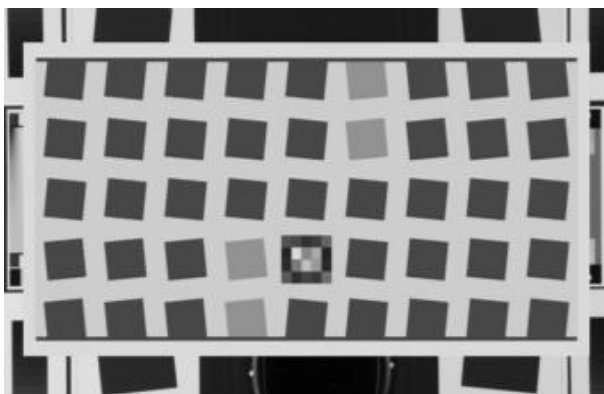
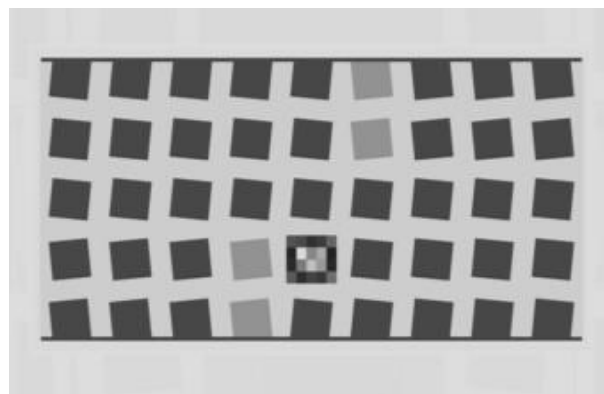


Рис.4.2. Схема освітлення та навколишнього середовища

Далі встановлюємо телефон на штатив, та формуємо кадр, при цьому не користуємось зумом камери. У кадр повинна потрапляти саме тестова схема та білі краї над і під нею. Приклади сформованих кадрів на рисунку 4.3, а) поганий кадр, б) хороший кадр.



а) поганий кадр



б) хороший кадр

Рис.4.3 Сформований кадр

Отримане фотографуванням зображення відкриваємо програмою SFRplus та проводимо рекомендовані налаштування подані у супутній літературі до програмного забезпечення. Обираємо зони для аналізу.

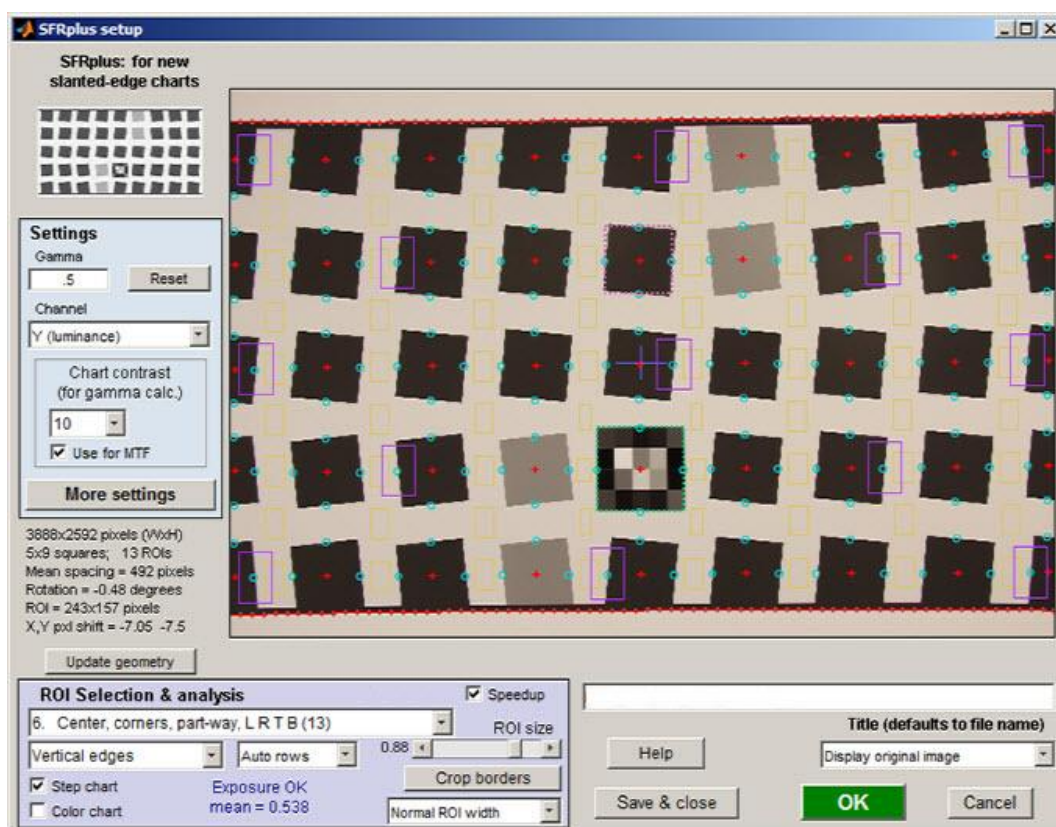


Рис. 4.5 Вікно програми SFRplus із обраними зонами для аналізу

На рисунку 4.6 показано вікно Rescharts SFRplus з ділянками Edge та MTF для регіону, розташованого поблизу центру.(Виділений регіон) Будь-який регіон може бути обраний.



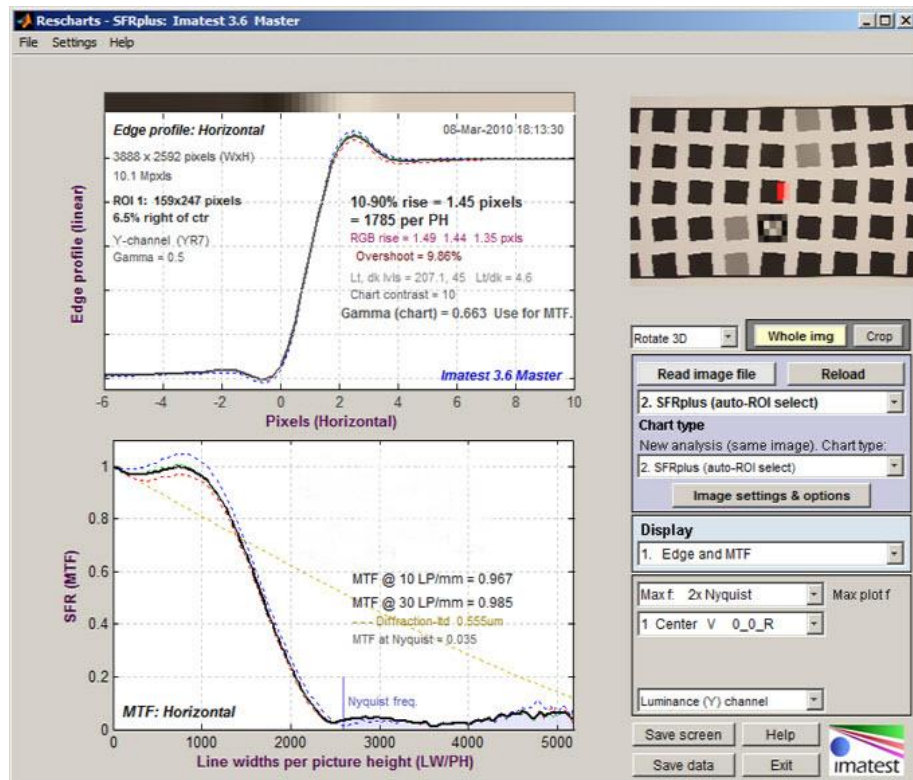


Рис.4.6 Вікно Rescharts SFRplus

Дослідження передбачає знаходження методу, який зможе використати пересічний громадянин у салоні магазину для порівняння реальних характеристик камер смартфонів представлених у магазині. Тому досліджувався саме вплив різноманітних факторів на результат. В ході проведення експериментів виявлено ключовий фактор, який унеможливорює створення онлайн бази усіх протестованих камер, а саме освітленість. Порівняння знімки з різних камер, зроблених за ідентичного освітлення можна вважати, такими, що несуть реальну інформацію для порівняння. Навть при незначній зміні освітлення, результуюча МПФ значно змінюється. Також проводилось дослідження впливу нахилу камери (тест міри) у горизонтальній площині. На відміну від освітлення при невеликих змінах кута нахилу, результуюча МПФ фактично не змінюється, і помітити це можна лише наклавши графіки один на один. (Рис. 4.7)

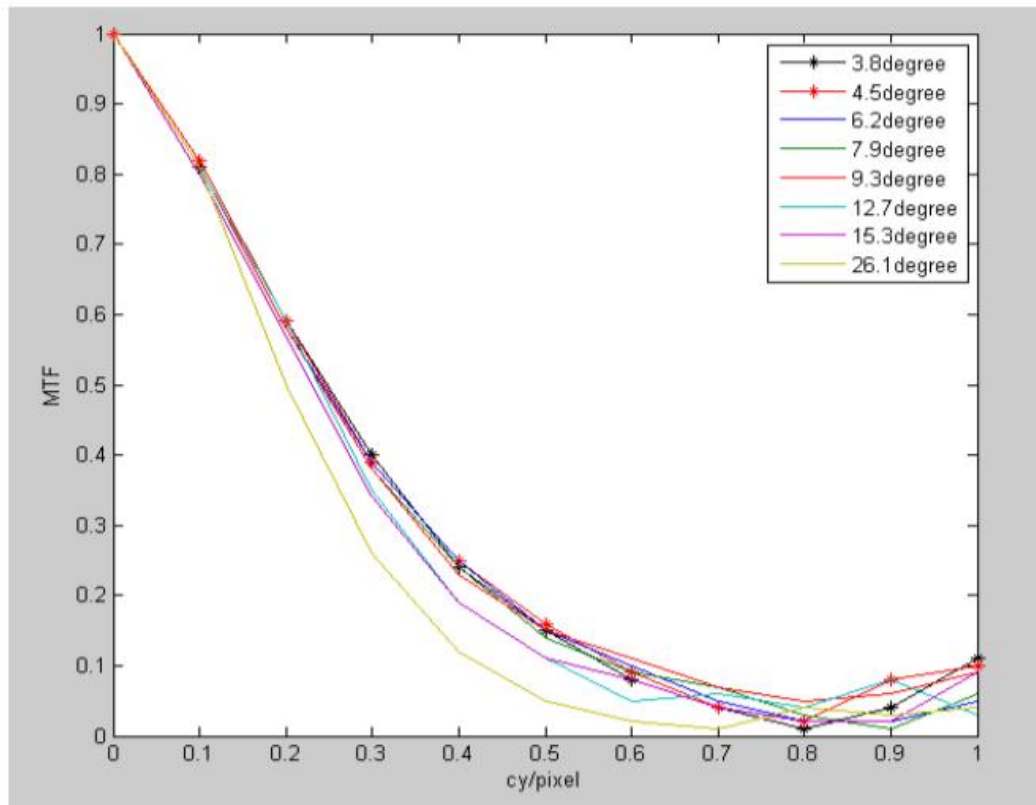


Рис. 4.7 Зміна МПФ залежно від кута нахилу похилого краю

У легенді до таблиці наведено кут нахилу похилого краю відносно вертикалі. З огляду на представлений графік можна стверджувати, що проведення дослідження із рядом камер можливе у побутових умовах, єдиною умовою для яких являється стабільне освітлення.

## **Розділ 5. Розробка стартап-проекту оцінювання якості цифрових камер для мобільних пристроїв**

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

В загальному розробка стартап-проекту включає себе низку етапів першим з яких являється маркетинговий аналіз стартап-проекту, що включає в себе розробку та опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів. При цьому аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації. На базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту

Наступним етапом являтиметься організація стартап-проекту, що включатиме в себе складання календарного план-графіку реалізації стартап-проекту, проводиться розрахунок потреби в основних засобах та нематеріальних активах та визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі.

Четвертим етапом являтиметься фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту, що буде включати в себе визначення обсягу інвестиційних витрат, розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту), визначатиметься рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

На останньому етапі проводиться визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів, складається інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом,



планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів, планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Дані етапи реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту

### 5.1 Опис ідеї проекту

Метод належить до оптичного приладобудування, зокрема до написання програмного забезпечення, що надає можливість якісної оцінки фактичних характеристик камер смартфонів. Даний метод буде цікавим в першу чергу всім користувачам смартфонів, що обирають пристрій за основним критерієм – якість камери. Також даний метод зацікавить блогерів, які займаються тестами й оглядами сучасних гаджетів, оскільки використання цих методів є більш об'єктивним ніж сучасні підходи.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Розробка системи оцінки якості камер мобільних пристроїв.	1.Тестування камер мобільних телефонів у салонах-магазинах, безпосередньо перед покупкою	Надання можливості кінцевому користувачу здійснювати об'єктивну оцінку пропонованих ринком камер та підбір оптимального пристрою під особисті потреби
	2.Тестування камер мобільних пристроїв під час створення відеооглядів, опису товарів інтернет магазинами	Отримання переваги перед інтернет оглядами, що опираються лише на візуальну оцінку якості, тим самим збільшити аудиторію переглядів

Висновок. Головним напрямком застосування являється використання у місцях продажу смартфонів, так як аудиторія ширша, та є можливість порівняти обрані моделі власноруч.

*Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту*

№ n/n	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	DXOMA RK	Optikos	A Plus			
1.	Доступність	Необхідні стабільні умови освітленості	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження			✓
2.	Точність вимірювання	За стабільних умов висока	Висока	Висока	Висока		✓	
3.	Відкритість результатів	Відкриті	Відкриті для обмеженого ряду пристроїв	Закриті	Закриті			✓
4	Універсальність	Дозволяє провести дослідження будь-яких смартфонів	Відображає показники якості лише флагманських смартфонів	Дозволяє провести дослідження будь-яких смартфонів	Проводить виключно стандартизацію		✓	
5	Простота відображення результатів	Відображення графіку МПФ	Відображення низки показників, на основі яких робиться висновок про якість камери	Дослідження проводяться лише фахівцем, який в подальшому формує звіт	Перевіряється лише відповідність до заявлених характеристик			✓

Висновок. Головною перевагою проекту для кінцевого користувача, являється інтуїтивна зрозумілість отриманих результатів.

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного розділу буде проведено аудит методу реалізації проекту. Це передбачає аналіз таких складових, як доступність технології, наявність технології та її опис.

*Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту*

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення портативного стенду для оцінки якості камер смартфонів, що не потребує лабораторного встановлення	Розробка стенду на базі штрихових тест мір	Існуюча технологія	Доступний
2		Розробка стенду на базі тест міри у вигляді зірки Сіменса	Існуюча технологія	Недоступний
3		Розробка стенду на основі використання методу похилого краю	Метод існує, для даної технології не застосовується	Доступний
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: «Розробка стенду на основі використання методу похилого краю»				

Висновок. Із таблиці 5.3 обрано пункт 3, оскільки даний метод дозволяє надати точні результати за мінімальної кількості проведених обчислень, що дозволяє проводити дану операцію безпосередньо на смартфоні.

## 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

*Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту*

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Співпраця у розробці камер мобільних телефонів із виробниками на етапі розробки
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стангує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція Час на отримання ліцензії
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандарту ISO13322
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

Висновок. Коефіцієнт рентабельності не являється високим, але ринок являється перспективним, оскільки потребує нових розробок доступних для кінцевого користувача.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл.5.5).

*Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту*

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
	Необхідність якісного, інтуїтивно зрозумілого аналізу якості камер мобільних телефонів	Користувачі смартфонів, що активно користуються камерами своїх пристроїв.	Вписати фактори, що формують поведінку клієнта (стандарти, технічні регламенти, інші фактори цінового та нецінового характеру) та особливості купівлі та експлуатації товару	Вільний доступ Висока точність Доступність Простота в експлуатації

Висновок. Головною потребою являється якісна оцінка якості камер, що дозволяє подати результати вимірювань у доступній формі.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ n/n	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Швидкий розвиток сучасних технологій в сфері цифрових камер	Динаміка продажу смартфонів на сьогоднішній день спадає	Проведення рекламної кампанії, що акцентує увагу на якості знімків із новими смартфонами (співпраця з виробниками)
2	Відсутність якісної оцінки усіх продуктів лінійки (лише преміальні)	Популярністю все більше користуються преміальні моделі, детальний аналіз яких наявний	Акцентування уваги на якісних камерах бюджетних смартфонів

Висновок. Даний сегмент на ринку являється не насиченим, в результаті чого, зацікавленість користувачів в даній технології низька

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ n/n	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Вихід на ринок принципово нових систем, що значною мірою відрізняються в якості	Збільшення обсягів продаж за рахунок просування новітніх технологій.	Прискорення виробництва стендів та продажу ліцензій
2	Потреба у зміні пристрою, через сповільнення його роботи в результаті тривалої експлуатації	Збільшення обсягів продаж через пряму потребу користувача.	Прискорення виробництва стендів та продажу ліцензій

Висновок. Головним фактором, що сприяє поліпшенню становища даного сегменту на ринку являється поява нових технологій в сфері мобільної фотографії.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Конкуренція монополістична	На ринку представлено дві компанії, одна з яких являється виробником обладнання для тестування камер, інша виступає в ролі незалежного експерту у оцінці якості камер	Розробка власного обладнання із використанням методу описаного у роботі
2. За рівнем конкурентної боротьби глобальна	Результати роботи експертної компанії доступні у всьому	Здійснювати перевірку значно більшої кількості

	світі, та охоплюють результати тестування переважної більшості камер	камер, та надавати їх порівняльну характеристику
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Ринок смартфонів	Розширювати можливості системи, створення бази отриманих результатів
4. Конкуренція за видами товарів: - між бажаннями	Спостерігається конкуренція між виробниками смартфонів, що співпрацюють з компанією експертом	Надання незалежних оцінок
5. За характером конкурентних переваг нецінова	Надання користувачам можливості самостійної оцінки будь-яких пристроїв	Розширення мережі встановлення стендів
6. За інтенсивністю - марочна	Велику роль відіграє репутація компанії	Збільшення обсягів реклами

Висновок. На ринку не велика кількість конкурентів, оскільки ринок можна вважати специфічним. При цьому існуючі компанії, або надають інформацію лише про флагманські моделі смартфонів, або подана ними інформація являється у формі не зрозумілій пересічному користувачу.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9).

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Потенційні конкуренти уже представлені на ринку	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки : Ринок є насиченим, проте конкуренція не висока, оскільки відкритою залишається потреба аналізу усіх продуктів лінійки.	Optikos DXOMARK APlus	Час на отримання ліцензії	Постачальники не диктують умови на ринку.	Клієнти орієнтуватися не лише на цінову пропозицію, але й на наявність пристрою в торгівельній мережі	На сьогоднішній день відсутні

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл. 5.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 5.6-5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

*Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності*

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Доступність та універсальність	Пропонований пристрій дозволяє проводити тестування камер безпосередньо кінцевим користувачем, що збільшує кількість протестованих камер, та збирає усі статистичні дані до єдиної бази
2	Простота	Відображення оціночних характеристик у зрозумілій цифровій формі.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11).

*Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»*

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з DXOMARK						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність	15							✓
2	Програмна частина	12				✓			
3	Репутація	10		✓					
4	Доступність								✓
5	Універсальність	18				✓			

Висновок. Надано перевагу таким факторам, як точність та доступність, що сприятиме позитивному рішенню клієнта.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

*Таблиця 5.12. SWOT- аналіз стартап-проекту*

Сильні сторони: доступність, простота відображення результатів, відкритість результатів	Слабкі сторони: низька репутація підприємства.
Можливості: Проведення рекламної кампанії. Реальне відображення якості камер бюджетних смартфонів	Загрози: спадаюча динаміка продажу смартфонів

Далі базуючись на SWOT-аналізі розробляємо альтернативи ринкової поведінки.

*Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту*

№ n/n	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Створення першого прототипу пристрою	Швидке отримання ресурсів, через зацікавлення з боку виробників бюджетних смартфонів	1-2 місяці

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Далі визначимо визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

*Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів*

№ n/n	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Користувачі смартфонів	Висока	Середній	Низька	Висока
2	Мережі магазинів з продажу смартфонів	Середня	Середній	Низька	Середня
Які цільові групи обрано: Мережі магазинів з продажу смартфонів					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обрано стратегію концентрованого маркетингу для цільової групи, мережам магазинів з продажу смартфонів

Для роботи в даному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

*Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку*

№ n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Створення лабораторії для аналізу якості камер,	Адаптація до ринку	Співпраця із виробниками бюджетних смартфонів	Стратегія диференціації



	що базується на даній технології			
--	----------------------------------	--	--	--

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.5.16).

*Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки*

№ n/n	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так	Співіснувати на неконкурентних засадах	Ні	Заняття конкурентної ніші

*Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування*

№ n/n	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Якість	Стратегія спеціалізації	Точність	Точність, швидкість, якість
2	Доступність	Стратегія диференціації	Незалежність від лабораторних умов	Легкість, простота у використанні, простота у проведенні вимірювань
3	Простота	Стратегія спеціалізації	Виведення інформації у зрозумілій формі	Простота у проведенні вимірювань, проста інтерпретація результатів, програмна частина втілена в зрозумілому додатку для смартфона

## 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач.

*Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару*

№ n/n	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність	Високу стабільну точність при порівнянні камер за ідентичних умов	Забезпечує конкурентно спроможну точність
2	Універсальність	Дозволяє працювати з будь-якими смартфонами	Дозволяє перевіряти будь-які смартфони, а не лише ті за які існує домовленість із компанією виробником

Висновок. Вигідними характеристиками товару являються точність та універсальність, що надають перевагу даному пристрою на ринку.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару		Сутність та складові	
I.	Товар за задумом	Прилад проводить оцінку фактичної роздільної здатності та шумів камер смартфонів.	
II.	Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	
		1. Тест міра	0,8x1м
		2. ПЗ	Android та ios сумісне
		Відповідно до ISO13322	
		Пакування тубус	
		Марка: «SSystem, CamTest»	
III.	Товар із підкріпленням	До продажу навчальні відео	
		Після продажу підтримка, та порівняння отриманих результатів у єдиній базі	
За рахунок розповсюдження лише скопільованої програми.			

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ n/n	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	150000	Відсутні	10000	1000

Висновок. Оскільки передбачається масове розповсюдження товару та дешевизна виготовлення тест міри, його ціна значно нижча за існуючі системи.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ n/n	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Попереднє замовлення	Доставка в обумовлені строки	Прямий	Прямий

Висновок. Оскільки ринок збуту, що обслуговується вузький, використовуємо прямий канал збуту.

Популяризації власної продукції сприятиме проведення маркетингових кампаній, що базуватимуться на проведенні оглядів популярних моделей смартфонів, для зацікавлення користувача. Також необхідно мати власний сайт, метою якого буде: популяризація продукту, демонстрація роботи з системою, та роз'яснення отриманих числових значень.

## **Висновки до розділу**

За результатами проведеного аналізу реалізації ідеї стартап-проекту з розробки методу дослідження фактичних показників якості камер мобільних телефонів можна зробити загальні висновки.

Попит на продукцію (метод) великий, адже хоча ринок продажу смартфонів спадає, проте вибагливих до камер користувачів досить багато. Існуючий на сьогоднішній день аналіз камер охоплює не великий сегмент серед усіх пристроїв, що спонукає блогерів до проведення суб'єктивної оцінки якості камер решти телефонів. Пропонований метод спрямований на задоволення потреб кінцевих користувачів, у плані контролю якості обраного телефону.

Конкуренція на світовому ринку присутня, проте вони займають певний сегмент ринку, а саме компанія DXOMARK публікує дослідження лише визначених моделей смартфонів (флагманські моделі, та моделі на які є замовлення компанії виробника), компанія Optikos яка випускає дороговартісне обладнання для контролю якості та програмне забезпечення до нього (використання даного методу передбачає значні фінансові затрати та знання у фаховій області), компанія APlus проводить лише стандартизацію виробів на замовлення виробників.

Головною перевагою на ринку являється універсальність та доступність методу, що дозволить якісно оцінити будь-який пристрій. Саме тому питання конкуренції й не являється першочерговим.

В якості альтернативи пропонується створити власну лабораторію із стендом, та проводити огляди камер, що цікавлять користувачів. В такому випадку акцент буде зроблено на ведення блогу, та діалогу із зацікавленими користувачами.

Підсумовуючи вищесказане, вважаю подальшу імплементацію доцільною.

## **Висновки**

В ході роботи було проведено аналіз сучасного стану проблеми дослідження якості камер для мобільних пристроїв та виявлено їх проблемні сторони. Після чого діяльність була спрямована на детальний розгляд методів оцінки якості камер мобільних телефонів, для мінімізації виявлених проблем. Для цього було проведено аналіз критеріїв оцінки якості камер, і на основі сучасних нормативних документів показано доцільність використання МПФ, як однієї із основних характеристик якості оптичної системи.

Базуючись на методі похилого краю, згідно з існуючими стандартами, було проведено експеримент для виявлення можливих впливів на результати вимірювань. В результаті було виявлено, що результати вимірювань сильно залежать від освітленості, що в свою чергу унеможливорює розробку простої та універсальної системи для контролю якості камер. Головною перевагою методу похилого краю є необхідність отримання лише одного зображення тест міри для отримання МПФ. Тому іншим важливим досліджуваним параметром, був кут нахилу контрастного похилого краю тест міри відносно піксельних стовпців (рядків) на задані кути. Дослідження показало, що при не значній зміні кута нахилу отримані дані можна вважати достовірними для характеристики якості оптичної системи. Підсумовуючи вище сказане можна стверджувати, що за допомогою пропонованої системи можна провести якісний порівняльний аналіз МПФ ряду камер смартфонів, за умови однакового освітлення («робота в межах одного приміщення»).

Подальше продовження роботи над цією проблемою передбачає більш детальний розгляд впливу освітленості на результати вимірювань. Детальний розгляд питання цифрових шумів. Написання ios та Android сумісного програмного забезпечення для проведення обрахунків безпосередньо на мобільному пристрої.

## Література

1. Slavuj R., Green P., To develop a method for estimating spectral reflectance from camera RGB values, The Norwegian Color and Visual Computing Laboratory, Gjøvik, Norway
2. Кучеренко О.К. Юстування та випробування оптичних приладів: Конспект лекцій./О.К.Кучеренко -К.: ІВЦ «Політехніка», 2012.-112 з.:іл.
3. Метод вимірювання подуляційної передавальної функції камери з матричним приймачем випромінювання/ В. Г. Колобродов, О. М. Явдошак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. - № 3. – с.58-61.
4. How to Measure MTF and other Properties of Lenses. – Opticos Corporation,1999. – 64 с.
5. <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/viewFile/503/488-radap.pdf>
6. <https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/index.html>
7. Д.С. Ватолин Алгоритми стиснення зображень. Методичний посібник./ Д.С. Ватолин Видавничий відділ факультету Обчислювальної Математики і Кібернетики МГУ ім. М.В.Ломоносова (ліцензія ЛР <sup>1</sup> 040777 від 23.07.96), 1999 р. - 76 с.
8. Коваль С.Т. Енергетичний розрахунок оптичного каналу ОЕП: Методичні вказівки/ С.Т. Коваль –К. 2013. -11 з іл.
9. Гуревич М.М. Фотометрия. Теория, методы и приборы. изд.2-е переработанное и дополненное/М.М. Гуревич — Л.: Энергоатомиздат. — Ленингр. отд-ние, 1983. - 136с
- 10.Коротаев В. В., Мусяков В. Л. Энергетический расчет ОЭП / Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 44 с.
- 11.<http://ru.quickmtf.com/slantededge.html> - етапи обчислення МПФ у додатку Quick MTF

12. Wei-Feng Hsu. Measurement of the spatial frequency response of digital still-picture cameras using a modified slanted edge method/ Wei-Feng Hsu, Yun-Chiang Hsu, Kai-Wei Chuang// Input/Output and Imaging Technologies II. Taipei, Taiwan, 26-27 July 2000. 2000. -с.96-103.
13. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений.— М.: Сов. радио, 1979. — 312 с.
14. Хорн Б. К. П. Зрение роботов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 487 с.
15. Александр Ефремов. Секреты Raw. Фотосъёмка в профессиональном формате. 2 издание. — «Питер», 2010. — С. 148
16. Брюс Фрейзер. Реальный мир Camera Raw и Adobe Photoshop CS2 = World Camera Raw with Adobe Photoshop CS2. — «Вильямс», 2007. — С. 304
17. Сергей Асмаков. JPEG, TIFF и RAW: в чём разница? (рус.). «Компьютер Пресс» (ноябрь 2004)
18. Глинченко Цифровая обработка сигналов. Версия 1.0 – 242с.
19. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.—М.: Мир, 1982.— Кн.1 — 312 с.
20. Optikos Meridian Family Datasheet\_01.26.2018
21. Optikos I-SITE Datasheet\_02.01.2016
22. <http://www.strollswithmydog.com/the-slanted-edge-method/> - The Slanted Edge Method
23. J Mazzetta, Digital Camera Imaging Evaluation, Electro Optical Industries
24. Don Williams and Peter D. Burns, Applying and Extending ISO/TC42 Digital Camera Resolution Standards to Mobile Imaging Products
25. Richard H. Vollmerhausen Donald A. Reago, Jr. Ronald G. Driggers, Sampled Imaging Systems, SPIE Press
26. Chunchang Xiang, Xinhua Chen, Yuheng Chen, Jiankang Zhou, Weimin Shen, MTF measurement and imaging quality evaluation of digital camera with slanted-edge method

- 27.M.Estribau\*, P.Magnan, Fast MTF measurement of CMOS imagers using  
ISO 12233 slantededge methodology
- 28.ISO 12233
- 29.<https://4pda.ru/2017/01/22/334166/>